

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présentée par :

AMROUCHE Fadhila

Thème

**Etude de la fiabilité du confinement de cylindres en béton avec des bandes
hélicoïdales en Polymère renforcées de fibres de jute.**

Devant le jury composé de :

M Dehmous Hocine

Maitre de conférence classe A Président

M^{me} Ali Ahmed Chafika.

Maitre de conférence classe A Rapporteur

M^{me} Kheloui Fatma.

Maitre de conférence classe A Examinatrice

Soutenue le : 04/05/2018

LISTES DES FIGURES

Figure I. 1. Chronologie de l'évolution des connaissances.....	6
Figure I. 2. La densité de probabilité (à gauche) et la fonction de répartition (à droite) de la loi normale.....	14
Figure I. 3. Allure de la fonction de densité de la loi log normale.....	15
Figure I. 4. Allure de la fonction de densité et de répartition de la loi exponentielle.....	16
Figure I. 5. Allure de la fonction de densité de la loi de Gumbel.....	16
Figure I. 6. Allure de la fonction de densité de la loi de Weibull.....	17
Figure I. 7. Domaine de défaillance, état limite et domaine de sécurité.....	19
Figure I. 8. Répartition d'une fonction de densité.....	20
Figure I. 9. Représentation du point de conception.....	21
Figure I. 10. Simulation de Monte Carlo dans l'espace standard.....	23
Figure I. 11. Approximation FORM.....	25
Figure I. 12. Approximation SORM.....	26
Figure II. 1. Application de pans métalliques selon le procédé d'Hermite (Hamelin 2002).....	31
Figure II. 2. Renforcement des structures par l'ajout de voiles en béton armé.....	32
Figure II. 3. Renforcement des structures par l'ajout des contreventements métalliques (Fardis 2009).....	32
Figure II. 4. Renforcement par précontrainte.....	33
Figure II. 5. Schéma illustratif d'un matériau composite.....	34
Figure II. 6. Différents matériaux de matrice.....	36
Figure II. 7. Différents matériaux de renfort.....	38
Figure II. 8. Différentes fibres naturelles.....	39
Figure II. 9. Exemple de confinement d'un poteau.....	44
Figure II. 10. Béton armé confiné par PRF et tube en acier.....	45
Figure II. 11. Stratification au contact (WBAC 2003).....	46
Figure II. 12. Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A.....	47

Figure II. 13. Enroulement filamentaire ((a) Monti 2003, (b) Master Builders, inc. And structural preservation systems 1998, balaguru et al. 2009).....	48
Figure II. 14. Chemisage par coquille préfabriquée « PRF ».....	49
Figure II. 15. Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites.....	50
Figure II. 16. Poutres en BA renforcées par matériaux composites.....	50
Figure II. 17. Tablier de pont en BA renforcé par matériaux composites.....	51
Figure II. 18. Confinement des murs avec de PRF.....	51
Figure III. 1. Essai d'écrasement sur le béton confiné avec PRFJ.[31].....	54
Figure III. 2. Interface principale de R. GUI.....	58
Figure III. 3. Dénomination des lois de probabilité dans R.....	59
Figure III. 4. Dénomination des graphiques dans R.....	61
Figure III. 5. Distribution normale de la variable D.....	66
Figure III. 6. Distribution normale de la variable F.....	66
Figure III. 7. Distribution normale de la variable L.....	66
Figure III. 8. Distribution de la variable S.....	67
Figure III. 9. Distribution normale de la variable t.....	67
Figure III. 10. Distribution de la variable ffrp.....	67
Figure III. 11. Organigramme de l'analyse fiabiliste des cylindres confinés.....	68
Figure III. 12. Etapes d'exécution d'un algorithme génétique.....	69
Figure IV. 7. Evolution de Pf en fonction du chargement F, pour CV=15%.....	75
Figure IV. 8. Evolution de Pf en fonction du chargement F, pour CV=20%.....	76
Figure IV. 9. Effet de la variabilité du coefficient de variation sur la probabilité de défaillance Pf.....	76
Figure IV. 10. Probabilité de défaillance (échelle logarithmique) en fonction de la force F.....	77
Figure IV. 11. Effet de la variabilité du coefficient de variation sur l'indice de fiabilité β	78
Figure IV. 12.....	79
Figure IV. 13 Résultats de l'optimisation.....	80

LISTES DES TABLEAUX

Tableau III. 1. Résultats du test de normalité.....	62
Tableau III.2 Résultats du test de sensibilité.....	64
Tableau III.3 Variables aléatoires à retenir pour le calcul fiabiliste.....	65
Tableau IV. 1 Représente les résultats de l'optimisation	80

Remerciement

Dédicace

Resume

Abstract

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I : Synthèse bibliographique

I. 1. Introduction.....	4
I. 2. Évolution de l'étude du risque et de la sécurité.....	4
I.2. 1. À propos du risque.....	5
I.2. 2. Évolution de l'étude du risque.....	6
I.2. 3. Objectif de la sécurité.....	7
I.2. 4. la fiabilité du point de vue des normes européennes.....	8
I.2. 5. Qu'est ce qu'une approche probabiliste ?.....	9
I.3. méthodologie.....	9
I. 4. Notions de probabilité.....	10
I.4. 1. Notions de variable aléatoire.....	10
I.4.1. 1. Qu'est ce qu'une variable aléatoire ?.....	10
I.4.1. 2. Quelques caractéristiques d'une variable aléatoire.....	11
I.4.1. 3. Variable aléatoire discrète.....	12
I.4.1. 4. Variable aléatoire continue.....	12
I.4. 2. Lois de probabilité.....	13

I. 5 Analyse de la fiabilité des structures.....	17
I.5. 1 Définition de la fiabilité.....	18
I.5. 2 Concepts fondamentaux de l'analyse de fiabilité.....	18
I.5. 3 Principe de la théorie de la fiabilité pour les ouvrages.....	18
I.5.3. 1 Surface d'état limite et mode de défaillance.....	18
I.5.3. 2 Probabilité de défaillance et indice de fiabilité.....	20
I.5. 4 Méthode d'analyse de fiabilité.....	22
I.5.4. 1 Méthode de simulation de Monte Carlo.....	22
I.5.4. 2 Méthode d'approximation.....	24
I. 6 Application à la structure en béton confiné avec des matériaux composites.....	26
I. 7 Conclusion.....	27

Chapitre II : Confinement des structures avec des matériaux composites

II. 1 Introduction.....	28
II. 2 Problématique du renforcement.....	28
II. 3 Le concept du renforcement.....	29
II. 4 Notion sur les techniques de renforcement classiques.....	30
II. 5 Techniques de renforcement modernes.....	32
II. 6 Définition d'un matériau composite.....	34
II.7. 1 La matrice.....	35
II.7. 2 Le renfort.....	35
II. 8 Classification des matériaux composites.....	35
II.8. 1 Suivant la nature des matrices.....	35
II.8. 2 Suivant la forme de la fibre.....	36
II.8.2. 1 Les composites à fibres.....	36

II.8.2.2 Composites à particule.....	39
II. 9 Type de matériaux composites.....	39
II.9.1 Composites à grande diffusion.....	39
II.9.2 Composites à haute performance.....	40
II. 10 Caractéristiques des matériaux composites.....	40
II. 11 Domaine d'application.....	40
II. 12 Application des composites en génie civil.....	41
II. 13 Notion de confinement.....	43
II. 14 Principe du confinement.....	44
II. 15 Types de confinement.....	44
II. 16 Quelques techniques du confinement avec des FRP.....	46
II. 17 Renforcement de quelques éléments de la structure.....	49
II. 18 Les avantages du confinement par les composites FRP.....	52
II. 19 Conclusion.....	52

Chapitre III : fiabilité des cylindres confinés avec des bandes en PRFJ

III. 1.Introduction.....	53
III. 2. Modèle utilisé.....	53
III.2. 1. Contexte déterministe.....	53
III.2. 2. Contexte probabiliste.....	55
III. 3. Aperçu sur le fonctionnement du logiciel R	
III.3. 1. Origines.....	57
III.3. 2. Pourquoi utiliser R ?.....	58
III.3. 3. Créer des objets dans R.....	58
III.3.3. 1. Les données.....	58

III.3.3.2 Les fonctions.....	60
III.3.4. R et les statistiques.....	60
III.3.5. R et les graphiques.....	60
III.4. Application de la méthode FORM.....	61
III.4.1. Test de normalité.....	61
III.5. Identification des variables.....	62
III.5.1. Variables aléatoires.....	62
III.5.2. Analyse de sensibilité.....	63
III.5.3. Distributions des variables aléatoires.....	65
III.6. Algorithme de l'analyse de la fiabilité.....	68
III.7. Optimisation mathématique, à l'aide des algorithmes génétiques (AG).....	69
III.8. Conclusion.....	70

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction.....	71
IV.2. Résultats de l'analyse de fiabilité.....	71
IV.2.1. Evolution de l'indice de fiabilité en fonction du chargement.....	71
IV.2.2 Evolution de la probabilité de défaillance Pf en fonction du chargement.....	72
IV.3. Prise en compte de l'effet de la variabilité des paramètres sur la fiabilité.....	73
IV.4. Optimisation de la probabilité de défaillance des cylindres confinés, par les algorithmes génétiques.....	78
IV.5. Conclusion.....	80
Conclusion générale.....	81
Références bibliographiques.....	83

L'un des problèmes majeurs dans le domaine de la construction est la dégradation des structures. La plupart des structures présentent des signes de faiblesse et ne répondent plus aux exigences pour lesquelles elles ont été conçues. Alors que La plus grande partie des ouvrages de génie civil est conçue pour durer une centaine d'années en moyenne. En revanche le matériau béton demeure relativement fragile, puisque environ 30% des ouvrages en béton nécessitent une réparation pour assurer la sécurité des usagers avant d'arriver à leur limite de vie utile.

Les causes sont multiples, on peut citer : des erreurs lors de l'étude ou de l'exécution, un accroissement des charges, un changement de l'exploitation de la structure, la corrosion des armatures, des actions accidentelles telles que les séismes ou les chocs, etc. L'apparition de ces problèmes ne laisse entrevoir que deux solutions : la reconstruction ou la réparation. Dans la plupart des cas les frais de la reconstruction sont beaucoup plus importants que ceux de la réparation ou du renforcement, ce qui rend ces alternatives plus appropriées.

Par ailleurs, bien que rares, des événements tels que ruptures de tuyauteries, de réservoirs, ou d'enceintes peuvent conduire à des conséquences extrêmement graves. Jusqu'au début des années 2000, on se protégeait de ces événements par l'utilisation des méthodes traditionnelles de dimensionnement, qui s'appuient généralement sur l'utilisation des coefficients ou indices de sécurité permettent d'assurer la pérennité de la structure et de couvrir les incertitudes inhérentes.

Néanmoins ces méthodes conduisent dans la plupart du temps à un dimensionnement injustifié. Les calculs étaient, jusque-là, conduits par les méthodes déterministes qui permettent à l'ingénieur d'effectuer de simples applications et d'assurer des solutions plus au moins satisfaisantes, du point de vue de la sécurité.

Néanmoins elles ne permettent pas de connaître la véritable marge de sécurité et l'influence de différents paramètres sur la fiabilité. Face à l'inconvénient majeur de ces méthodes et le retour d'expérience, les méthodes fiabilistes ont vu le jour elles permettent de décrire les incertitudes dans un cadre bien adapté et d'étudier leur influence sur la validité du système mécanique étudié.

A cet effet L'originalité de ce travail réside dans l'association des deux outils prénommés, à savoir la démarche fiabiliste et la réhabilitation avec des matériaux

composites. On se propose, donc, d'évaluer la fiabilité du confinement de cylindres en béton avec des bandes hélicoïdales de matériaux composites en probabilisant les variables intervenant dans la fonction sollicitante et la fonction résistante de notre élément. L'intérêt de notre démarche est donc double puisqu'il s'agit, d'une part, de la mise en exergue de l'efficacité du renforcement avec ces matériaux, où un modèle reliant la résistance à la compression et les différents paramètres de confinement est établi. D'autre part, il s'agit de mettre en œuvre la procédure d'analyse de la fiabilité qui tient compte des incertitudes présentes, ainsi que des risques auxquels sont exposés les usagers.

De nos jours, bien que la réparation soit basée sur l'utilisation de nouveaux matériaux ou sur des techniques utilisant de nouvelles associations de matériaux.

Il s'agit donc dans notre étude de mettre en application, sous le logiciel R, le programme du calcul de la fiabilité du confinement avec des matériaux composite à matrice organique collés extérieurement sur la face collatérale des éprouvettes en béton. L'intérêt est, ainsi, porté sur le confinement de cylindres en béton avec le collage, en surface, d'un polymère renforcé de fibres de jute.

Dans l'analyse de la fiabilité des structures, les paramètres influents sont considérés comme des variables aléatoires et, à partir d'une équation physique de défaillance.

Une probabilité de défaillance et un indice de fiabilité sont alors calculés.

Les principaux objectifs de ce travail sont résumés comme suit :

- Avoir une vision réaliste sur les risques pouvant engendrer la ruine d'une structure et mieux connaître l'influence des incertitudes, afin d'aboutir à des conceptions mieux équilibrées et fiable vis-à-vis des règlements en vigueur.
- Mettre en évidence l'application d'une des méthodes développée par la mécanique probabiliste pour estimer la probabilité de défaillance et l'indice de fiabilité du système mécanique considéré et identifier l'effet de la variabilité de ces paramètres.
- Montrer l'efficacité de cette nouvelle technique de confinement avec un PRFJ, comme renfort structural en compression.

Pour répondre à ces objectifs, nous avons établi un plan de travail renfermant quatre chapitres.

Le **premier chapitre** de ce mémoire est consacré à une synthèse bibliographique qui porte sur l'analyse fiabiliste des structures, la présentation de ses méthodes d'application ainsi que son évolution au fil du temps.

Le **deuxième chapitre** est destiné à relater les causes des dégâts qui peuvent survenir dans les structures en béton et la nécessité de réhabilitation de celles-ci, en exposant les différentes techniques de réhabilitation qu'elles soient classiques ou modernes. Un intérêt particulier est accordé à la technique de confinement avec des matériaux composite à matrice organique.

Le **troisième chapitre** est lié à l'étude de l'analyse fiabiliste des cylindres confinés avec des bandes hélicoïdal en PRFJ, en tenant compte de la variabilité des différents paramètres de confinement. Un programme spécifique, utilisant la méthode FORM, a été établi sous le logiciel R. Il permet l'estimation de la probabilité de défaillance par la détermination de l'indice de fiabilité.

Dans le quatrième chapitre nous allons présenter les résultats obtenus lors de l'analyse de fiabilité, en mettant en évidence la relation existante entre les différents paramètres intervenant ainsi que leur variabilité sur la sureté de la structure étudiée.

Le travail est naturellement ponctué par une conclusion générale où seront rappelés l'essentiel des résultats du calcul fiabiliste, puis des suggestions seront formulées en guise de perspectives à de futures recherches.

I. 1.Introduction

La majorité des structures, construites dans les années soixante et soixante-dix, souffrent aujourd'hui de dommages parfois très importants et doivent faire l'objet d'inspections et d'évaluations afin de déterminer leurs capacités portantes actuelles.

D'une manière générale, les défaillances et les ruptures dans les structures sont rares. Par ailleurs, un certain niveau de sécurité est exigé en termes de résistance selon l'importance ainsi que de la destination de chaque ouvrage.

La conception des ouvrages en béton armé, consiste à déterminer les dimensions et les caractéristiques de leurs éléments pour qu'ils accomplissent certaines fonctions avec un degré de sécurité visé et qu'ils se comportent d'une manière satisfaisante lors de leur utilisation. Pour cela, une relation doit être établie entre l'action que subit la structure (le chargement : S) et sa réponse (la résistance : R).

L'analyse de la sécurité des structures en béton ou en béton armé est traditionnellement menée de façon déterministe à l'aide d'un paramètre unique, le facteur de sécurité. Ce dernier représente « le rapport entre une variable de chargement et une variable de résistance ». [1]

Néanmoins, il demeure inconnu pour une structure complexe, d'où l'obtention d'une résistance incertaine et l'existence d'un risque de ruine. C'est Pour cela que l'approche probabiliste a connu un développement significatif dans les travaux de recherche depuis les années soixante-dix. Elle vise à évaluer le risque par des méthodes d'analyse de fiabilité des systèmes mécaniques.

Ces méthodes sont basées sur des matériaux innovants, pour la conception des structures mécaniques qui présentent des performances spécifiques exceptionnelles par rapport aux matériaux traditionnelles.

I. 2.Évolution de l'étude du risque et de la sécurité

Il serait passionnant de prendre le temps de remonter l'histoire afin de comprendre comment l'homme a petit à petit, conquis des « incertitudes » suffisantes pour assurer raisonnablement le risque de ces dernières. [2]

Ainsi pour prendre en compte l'aléa dans la modélisation d'un problème mécanique, un ensemble d'outils statistiques et de méthodes probabilistes permet de quantifier

d'une part les sources d'incertitudes liées au problème et d'autre part, de propager ces incertitudes à travers un modèle numérique.

On ne peut pas choisir d'utiliser ou de concevoir des produits, sans s'exposer au danger, certes on peut choisir de minimiser l'intensité des dommages et leur probabilité d'occurrence, le contenu de l'étude du danger doit être lié à l'importance des risques engendrés par les différentes installations.

En général, différente de la fréquence historique, elle définit et justifie les mesures propres à réduire la probabilité et les effets de ces accidents.

I.2. 1. À propos du risque

Le risque zéro n'existe pas. C'est pour cela que dans les sociétés modernes, les populations demandent en vertu des lois une sécurité maximale des ouvrages. Les risques sont pris en connaissance lorsque des accidents ou des défaillances catastrophiques surviennent [3].

Les ingénieurs ne sont pas certains que ces défaillances spectaculaires peuvent affecter aussi bien des ouvrages anciens que des ouvrages actuels ; car lorsque l'ingénieur décide de concevoir ou de réparer une structure, il prend le risque de ces évolutions technologiques face aux nécessités étendues en matière de la maîtrise des risques en génie civil et ce, à travers :

- La définition des limites raisonnables.
- Le développement d'une approche scientifique pour la compréhension des phénomènes, pour la prise de conscience de la grande complexité des problèmes de risque. [4]

Le risque est défini, comme une mesure d'un danger associant un cas présent, d'un événement indésirable et une mesure de ses causes et conséquences.

Un danger est un inconvénient plus ou moins probable auquel on est exposé. Une propriété intrinsèque d'un objet ou d'une situation physique qui, dans certaines circonstances, peut provoquer des dommages pour la santé humaine, l'environnement ou les biens matériels.

Pour cela il faut placer le concept de la sécurité des structures dans une réalité physique où il n'y a pas d'absolu et où la connaissance n'est pas parfaite.

I.2. 2. Évolution de l'étude du risque

Il est facile de donner une revue de la littérature internationale sur le sujet du risque et d'aborder des applications académiques et industrielles à l'aide d'outils de calculs généraux.

L'intérêt de l'étude du risque remonte à l'antiquité, où l'homme s'intéressait à la connaissance géométrique et statistique partant de la sagesse des dieux. (Hammourabi roi de Babylone 1800 avant J.C) annonça un code d'engagement face au risque, fait par le concepteur pour l'utilisateur.

Au moyen-âge, des essais sur la maîtrise de l'incertain ont été inclus dans la construction des cathédrales mais s'avèrent toutefois erronées. [5]

À la renaissance, Léonard de Vinci (1452- 1519) rechercha par modélisation une relation entre les sollicitations et la résistance des poutres. Galilée (1564-1642) s'intéressa plus particulièrement à l'optimisation d'une poutre cantilever, initiant ainsi les premières modélisations. [5]

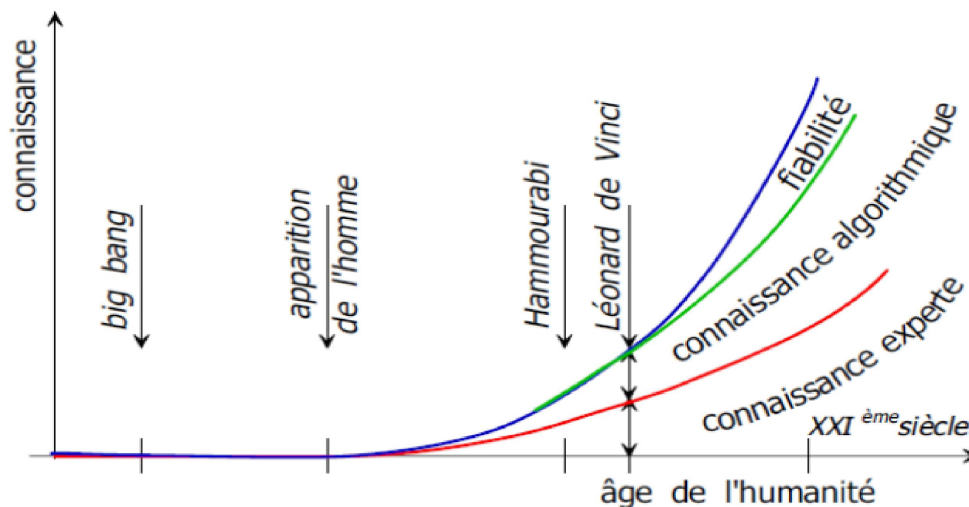


Figure I.1 : chronologie de l'évolution des connaissances

Les ingénieurs restent confiants envers cette connaissance des lois, ces modèles et ces solutions jusqu'alors adéquates. L'introduction de l'incertain et de la théorie de la probabilité, les conduisent ensuite à expliquer l'existence de la notion du hasard.

Blaise Pascal (1623 – 1662) explique, à travers la règle des parties, l'existence d'un écart non-modélisable dans la recherche de la maîtrise des connaissances et de la réalité physique. Cette règle stipule que l'homme tente des parties dont il dispose

théoriquement. Puisque les données ne peuvent être certainement modélisables, Blaise Pascal propose de prévoir le succès ainsi que l'échec, avec une espérance de gain ; Cela permet la justification des engagements en fonction de l'espérance.

Cette règle, apportant un enjeu commercial bien que technique, construit le fondement de calcul des probabilités. Ainsi, la réalisation des constructions et des machines de plus en plus audacieuses est possible en acceptant l'incertitude des données et des modèles.

Dans la maîtrise du risque, le dimensionnement fiable appartient à l'ingénieur et la gravité des conséquences à l'économiste et aux citoyens. À ce propos, il convient de citer les contributions suivantes :

- En 1926, *M. Mayer* (Allemagne) suggère l'utilisation des valeurs moyennes et des variables de dimensionnement.
- En 1947, *A.M. Freudenthal*(USA) admet le concept de la sécurité dans la réalité physique (absence de l'absolu et imperfection de la connaissance)
- En 1949, *A.R. Rjanitzyne* (Union Soviétique) définit le premier indice de fiabilité comme étant le rapport entre la moyenne et l'écart-type.
- En 1951, *R. Lévi* (France) propose un calcul probabiliste de la sécurité des constructions.

Depuis les années cinquante la sécurité des structures est basée sur des probabilités et l'intérêt des chercheurs se porte sur la formation des approches fiabilistes, où l'objectif est la maîtrise du risque en association avec l'incertain. [4]

I.2. 3. Objectif de la sécurité

Le principe de sécurité utilisé jusqu'au XIX^{ème} siècle est celui des « contraintes admissibles », reposant sur l'empirisme et l'expérimentation. Il consiste en le calcul de la contrainte maximale dans une section donnée, sous la combinaison d'actions la plus défavorable. Cette contrainte doit rester inférieure à une contrainte dite « admissible » déterminée par le rapport de la contrainte de ruine du matériau à un coefficient de sécurité **k**.

L'avantage de ce principe est la facilité de sa mise en œuvre. En revanche, il ne permet pas de prendre en compte la dispersion des paramètres intervenant dans le calcul, puisque un même coefficient leur est affecté. Cela conduit à des

surdimensionnements. En outre, la vérification des contraintes n'est pas le seul critère pour la vérification de la sécurité d'un ouvrage [6].

Des méthodes déterministes de calcul des structures ont connu une évolution en termes de réglementation. En France par exemple, plusieurs règlements ont été utilisés au fil du temps, à savoir EC 1, ENV1991, EC 2, etc.

Jusqu'au 1944, les règlements français définissent les principes et les exigences en matière de sécurité et d'aptitude au service des structures, décrivent les bases pour le dimensionnement et la vérification et fournissent des lignes directrices concernant les aspects de la fiabilité structurale qui s'y rattachent. [6]

Toutefois, les objectifs essentiels en matière de sécurité visent à protéger les personnes pendant et après un sinistre, s'assurer de la protection de l'environnement, la réduction des conséquences financières des défaillances ainsi que la réduction de l'impact économique et médiatique.

I.2. 4. La fiabilité du point de vue des normes européennes

Les Eurocodes, normes européennes de conception et de calcul des ouvrages de génie civil, sont basés sur une approche semi-probabiliste de la sécurité des constructions. Les apports des méthodes et concepts fiabilistes dans le processus d'élaboration de ces normes sont principalement la réduction des risques, l'optimisation des coûts, l'harmonisation de la sécurité et l'optimisation du cycle inspection-maintenance-réparation. [7]

Elles introduisent un certain nombre de concepts d'états limites, numériquement liés à certains niveaux de fiabilité, à savoir la fiabilité cible, les valeurs de calcul, les combinaisons d'actions, les erreurs des modèles et les coefficients partiels.

La fiabilité cible constitue une valeur seuil minimale conventionnelle qui doit garantir une durée de vie spécifiée des ouvrages, lorsqu'ils sont construits en respectant certains critères de qualité et maintenus dans des conditions normales.

La probabilité d'occurrence, seuil des divers états limites, se réfère aux conséquences d'une défaillance des ouvrages eux-mêmes d'une part, et aux éventuelles pertes en vies humaines d'autre part. Il convient de souligner que la fiabilité réelle est tributaire

des modèles de calcul de «résistance» et des modèles de charges ainsi que des risques d'occurrence d'erreurs grossières.

I.2. 5 Qu'est ce qu'une approche probabiliste ?

On appelle approche probabiliste la méthode qui s'appuie sur la théorie de la fiabilité pour évaluer la probabilité de défaillance ou l'indice de fiabilité de la structure. Le mode de fonctionnement de la structure est comme pour l'approche semi-probabiliste, décrit par un état limite mais les incertitudes liées aux paramètres d'entrée sont introduites sous forme de loi de probabilité affectée à chaque variable. Ces lois de probabilités sont établies à partir d'études statistiques sur les paramètres concernés. L'approche probabiliste consiste alors à calculer la probabilité de dépassement du critère d'état limite, appelé probabilité de défaillance P_f , que l'on compare à une probabilité de défaillance acceptable P_{adm} . [8]

$$P_f = P(R < S) \leq P_{adm} \quad (I. 1)$$

R : résistance de la structure vis-à-vis du mode considéré.

S : sollicitation appliquée.

I.3. Méthodologie

La fiabilité des structures a pour objectif d'évaluer la probabilité qu'une structure, soumise à des aléas (vibrations, température, chocs, fatigue, séisme,...etc.), soit capable de satisfaire l'intégralité de ses besoins et ce pour une durée de vie donnée. Cependant, le calcul de cette probabilité impose une méthodologie d'étude rigoureuse en quatre étapes :

1. définir un modèle mécanique déterministe adapté au problème traité ;
2. identifier les paramètres aléatoires de ce modèle et les modéliser par un outil probabiliste adéquat ;
3. définir les modes et scénarios de défaillance du problème ;
4. évaluer les probabilités d'occurrence de ces modes de défaillance.

La précision, l'exactitude du résultat et la probabilité de défaillance de la structure, sont ainsi conditionnées par un ensemble de facteurs experts, expérimentaux, mathématiques, numériques et pratiques intervenant à chaque étape de l'étude fiabiliste.

I. 3. Notions de probabilité

Le calcul des probabilités, est l'une des branches les plus récentes des mathématiques. En effet, Après avoir cantonné dans l'étude des jeux de hasard, il s'est introduit dans presque toutes les branches de l'activité scientifique, dont la source est l'étude de la quantité d'informations. On peut soutenir que toutes les mathématiques anciennes sont un cas particulier du calcul des probabilités, en considérant que le certain étant de l'aléatoire, dont la réalisation représente une probabilité égale à un. [1]

I.4. 1. Notions de variable aléatoire

Le concept de variable aléatoire formalise la notion de grandeur variant selon le résultat d'un tirage ou d'une expérience aléatoire [8]. Le concept de probabilité, quant à lui, formalise et quantifie l'incertitude du résultat de l'événement en considération.

I.4.1. 1. Qu'est ce qu'une variable aléatoire ?

Soit (Ω, f, p) un espace probabilisé. Une variable aléatoire peut être sous forme continu ou discrète. Une variable aléatoire discrète X associée à cet espace probabilisé est une application de Ω dans \mathbb{R} qui prend un nombre de valeurs fini ou dénombrable.

Si l'ensemble des valeurs possibles pour cette variable $X \in \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ est fini ou infini dénombrable, c'est donc une variable discontinu. Par exemple lors d'un lancer de dé, la variable aléatoire qui associe à chaque lancé, le numéro de la face apparaissant au-dessus est une variable aléatoire discrète car elle n'a que 6 états possibles [13] Cependant dans le même espace (Ω, f, p) , lorsque le nombre de valeur possibles de la variable considéré est infini, la variable est dite continue. Par exemple les taille, les poids, la durée de vie d'un produit particulier, ou erreur expérimentale de laboratoire peuvent prendre une infinité de valeur sur un intervalle. La variable aléatoire est caractérisée par une fonction de densité et fonction de répartition.

I.4.1. 2 Quelques caractéristiques d'une variable aléatoire

a. coefficient de variation

Le coefficient de variation est défini comme le rapport de l'écart type sur la moyenne

$$C_V = \frac{\sigma(X)}{\mu} \quad (I. 2)$$

b. Moyenne

La moyenne est le quotient de la somme de toutes les valeurs d'une série par l'effectif total.

$$\mu = \frac{\sum n_i}{N} \quad (\text{I. 3})$$

c. Ecart-type

L'écart type est une mesure de la dispersion d'une variable aléatoire ; en statistique, il est une mesure de dispersion de données. Il est défini comme la racine carrée de la variance (Carlton et al, 2014), (Igor et al, 2006).

$$\sigma(X) = \sqrt{V(X)} \quad (\text{I. 4})$$

d. Variance

En théorie des probabilités, la variance est une mesure servant à caractériser la dispersion d'un échantillon ou d'une distribution. Elle indique de quelle manière la variable aléatoire se disperse autour de sa moyenne. Elle est définie comme l'espérance du carré de la distance de X à sa moyenne μ (Carlton et al, 2014), (Igor et al, 2006).

$$V(X) = E[(X - \mu)^2] \quad (\text{I. 5})$$

e. L'espérance mathématique

En théorie des probabilités, l'espérance mathématique d'une variable aléatoire correspond à une moyenne pondérée des valeurs que peut prendre cette variable.

Dans le cas où la variable X prend une infinité dénombrable de valeur X_1, X_2, \dots, X_n avec les probabilités P_1, P_2, \dots, P_n l'espérance de X est définie comme suit :

$$E(X) = \sum_{i=1}^{\infty} X_i P_i \quad (\text{I. 6})$$

1.4.1. 3. Variable aléatoire discrète

On définit la probabilité attachée en un point x du domaine de définition de la variable aléatoire X discrète par [8]:

$$P(X = x) \quad (\text{I. 7})$$

- La fonction de répartition de X:

$$F(x) = P(X < x) = \sum_{t < x} P(X = t) \quad (I. 8)$$

I.4.1. 4. Variable aléatoire continue

On dit que la variable aléatoire X de fonction de répartition F est continue si on peut définir une fonction densité de probabilité f de X vérifiant [8] :

$$f(x) = F'(x) \text{ ou } F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (I. 9)$$

- La probabilité attachée au segment [a, b] est alors :

$$P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a) \quad (I. 10)$$

Pour apprécier pleinement une variable aléatoire, il est important de connaître quelles valeurs reviennent plus fréquemment et quelles sont celles qui apparaissent plus rarement. Une variable aléatoire est totalement définie par sa loi de probabilité. Les principales lois de distributions utilisées dans l'analyse fiabiliste (loi normale, log normale, uniforme et la loi de Weibull... etc.).

La notion de loi de distribution est considérée comme la propriété la plus importante d'une variable aléatoire, ainsi elle caractérise la probabilité avec laquelle elle peut prendre certaines valeurs.

Pour décrire cette probabilité de manière commode, on utilise deux fonctions : la fonction de répartition et la fonction densité de probabilité. La première peut être définie pour des variables discrètes et continue tandis que la deuxième n'est définie que pour les variables aléatoires continues.

I.4. 2. Lois de probabilité

En théorie des probabilités et statistiques, une loi de probabilité décrit le comportement aléatoire d'un phénomène dépendant du hasard. L'étude des phénomènes aléatoires a commencé avec l'étude des jeux de hasard. Jeux de dés, tirage des boules dans les urnes et jeu de pile ou face ont été des motivations pour comprendre et prévoir les expériences aléatoires. Ces premières approches sont des phénomènes discrets, c'est-à-dire dont le nombre de résultats possibles est fini ou au plus dénombrable. Certaines questions ont cependant fait apparaître des lois à support

infini non dénombrable ; par exemple, lorsque le nombre de tirages de pile ou face effectués tend vers l'infini, la répartition du nombre de piles obtenus s'approche d'une loi normale. [9]

Les principales lois probabilistes utilisées dans la fiabilité :

a. 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 %. [10]

Une variable aléatoire X obéit à une loi normale si et seulement si sa fonction de densité de probabilité est telle que définit par [11]:

$$\forall x \in \mathbb{R}, f_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \quad (\text{I. 11})$$

μ_x : La moyenne.

σ_x : écart-type de l'échantillon X ($X = x_1, x_2, \dots, x_n$).

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

$$\forall x \in \mathbb{R}, F_x(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \left[\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 \right] \right] \quad (\text{I. 12})$$

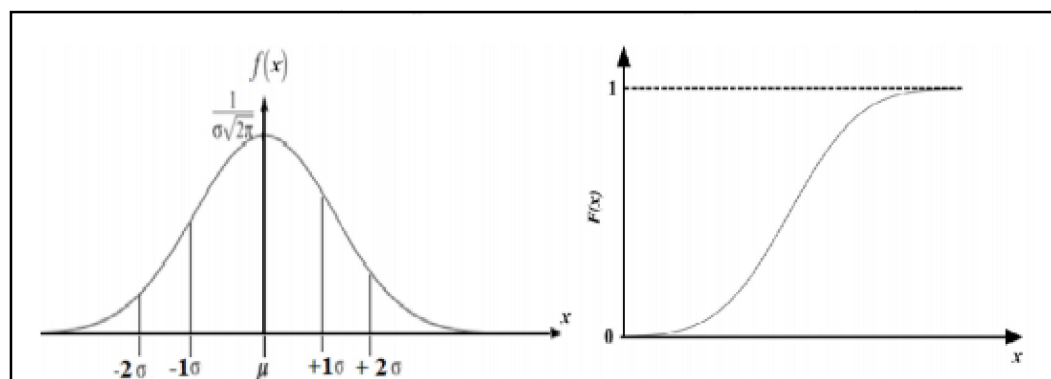


Figure I. 2. La densité de probabilité (à gauche) et la fonction de répartition (à droite) de la loi normale. [6]

a. La loi log normale (ou loi de Galton)

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 $]0, +\infty [$). Ainsi, la densité de probabilité s'exprime :

$$\forall x \in \mathbb{R}, f_x(x) = \frac{1}{x\sigma_y\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln x - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \tag{I. 13}$$

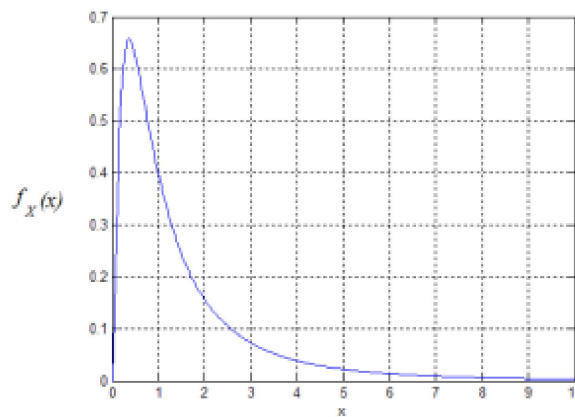


Figure I. 3. Allure de la fonction de densité de la loi lognormale.[7]

Avec μ_y la moyenne et σ_y l'écart-type de Y (on note $Y = \ln X \sim N(\mu_y, \sigma_y)$). La fonction de répartition s'écrit :

$$\forall x \in \mathbb{R}, F_x(x) = \frac{1}{\sigma_y\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\ln x} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 \right] dt \tag{I. 14}$$

b. La loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant [10]. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales, tel que représenté ci-dessous (Figure I.4).

La densité de probabilité d'une loi exponentielle de paramètre λ s'écrit :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{I. 15}$$

La fonction fiabilité :

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

(I. 16)

λ : Désigne le taux de défaillance pour une loi exponentielle.

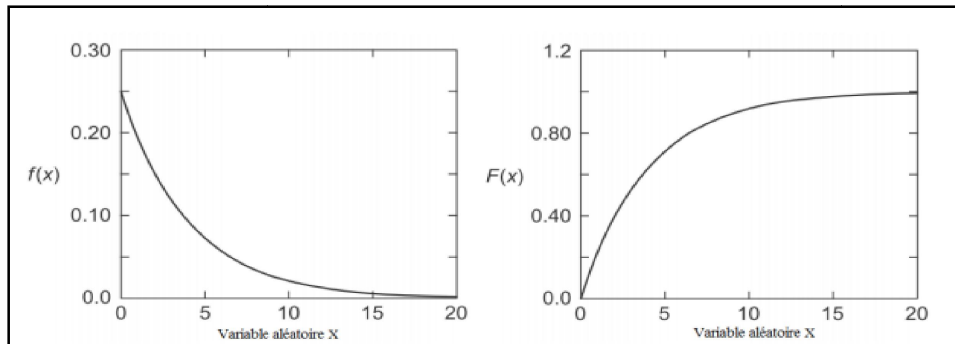


Figure I.4. Allure de la fonction de densité et de répartition de la loi exponentielle.[6]

c. Loi de Gumbel (loi des valeurs extrêmes de type I)

La loi de Gumbel est utilisée souvent pour modéliser les valeurs extrêmes ; valeurs max ou min choisie dans un ensemble de données (le débit de crue annuel max, (Figure I.5) les accélérations sismiques données sous forme d'un accélérogramme). Cette lois a l'instar de la loi de Weibull est définie avec deux paramètres : un paramètre de position λ et un paramètre de dispersion η . La fonction de densité de probabilité de la loi de Gumbel s'écrit comme suit [12]

La fonction densité de la loi de Gumbel s'écrit comme suit :

$$f(x) = \frac{1}{\eta} \left(\exp - \frac{x-\lambda}{\eta} \right) \exp \left(- \exp \left(- \frac{x-\lambda}{\eta} \right) \right) \quad (I. 17)$$

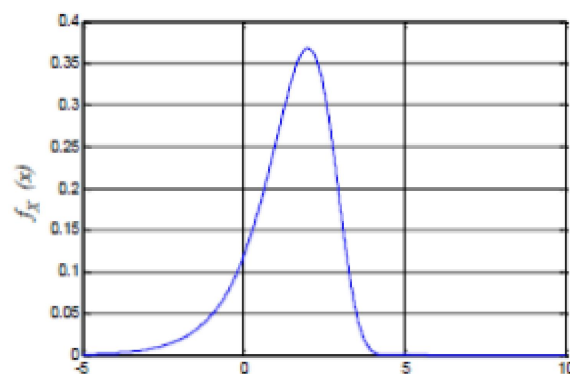


Figure I.5. Allure de la fonction de densité de la loi de Gumbel. [7]

d. La loi de Weibull

C'est la plus populaire des lois, utilisée dans plusieurs domaines (électronique, mécanique, etc). Elle permet de modéliser en particulier de nombreuses situations d'usure de matériel. Elle caractérise le comportement du système dans trois phases de vie : période de jeunesse, période de vie utile et période d'usure ou vieillissement [10]. Dans sa forme la plus générale, la distribution de Weibull dépend des trois paramètres suivants : β , η , et γ (Figure I.6). La densité de probabilité d'une loi de Weibull a pour expression :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\frac{(t-\gamma)}{\eta}} \quad (I. 18)$$

Où : β est le paramètre de forme ($\beta \geq 0$)

η Est le paramètre d'échelle ($\eta \geq 0$)

γ Est le paramètre de position ($\gamma \geq 0$)

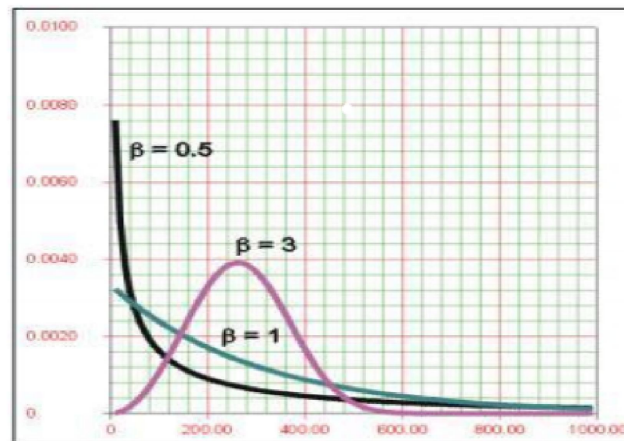


Figure I. 6. Allure de la fonction de densité de la loi de Weibull. [7]

I. 5. Analyse de la fiabilité des structures.

La conception des structures implique, la vérification d'un certain nombre de règles qui résultent, de la connaissance du comportement mécanique et de l'expérience des concepteurs et des fabricants.

Ces règles traduisent la nécessité de limiter les effets du chargement, tels que les contraintes et les déplacements.

Chaque règle représente un événement élémentaire, associé à un certain scénario de défaillance. L'analyse de fiabilité exige au moins un scénario de défaillance séparant les situations de bon fonctionnement des situations de défaillance. [14]

I.5. 1. Définition de la fiabilité

Définition technique donnée par L'AFNOR règle NF X50-120 «c'est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données, pendant une durée donnée. Le terme est utilisé comme caractéristique désignant une probabilité de succès ou un pourcentage de succès ».

De façon générale, on définit la fiabilité comme la probabilité qu'une installation ou un équipement assure, sous certaines conditions, le service pour lequel ils ont été conçus pendant une durée spécifiée. Si p_f désigne la probabilité de défaillance, la fiabilité est égale à $r=1-p_f$.

La fiabilité [5] s'intéresse en particulier à la probabilité qu'une structure connaisse une défaillance. Ce terme désigne tout un ensemble de situation dont le point commun est que la structure ne remplit plus le rôle pour lequel elle avait été conçue.

I.5. 2. Concepts fondamentaux de l'analyse de fiabilité

Il est bien connu que la plupart des phénomènes observables dans la nature contiennent un certain degré d'incertitude, d'ailleurs la répétition des mesures des phénomènes physiques produit des résultats différents. Quelques uns se montrent plus fréquents que d'autres. [15]

La présence de résultats qui ne suivent pas un comportement « prévisible » traduit l'incertitude et peut être caractérisée pour les propriétés probabilistes et statistiques.

Dans ce contexte, on ne peut pas assurer une performance satisfaisante de manière absolue et déterministe. Au contraire cette performance peut être assurée seulement en termes de probabilité, en considérant ou on introduisant des variables aléatoires satisfaisantes à ce genre de critère est, cette probabilité est appelée dans la terminologie de l'ingénierie « la fiabilité ».

I.5. 3. Principe de la théorie de la fiabilité pour les ouvrages

I.5.3. 1.Surface d'état limite et mode de défaillance

En fiabilité, la surface d'état limite d'un ouvrage de Génie Civil (ou d'une composante d'un système mécanique) est définie comme étant l'ensemble des valeurs du vecteur

aléatoire X pour lesquelles l'ouvrage se trouve juste à l'état limite de ruine. En termes mathématiques, la surface d'état limite

Séparant le domaine de défaillance du domaine de sûreté dans l'espace des variables aléatoires, est caractérisée par une fonction de performance G nulle (Figure I.10) Le mode de défaillance permet ainsi de définir la marge de sécurité en fonction d'état limite à respecter. Cette fonction d'état limite, notée G , fait intervenir différents paramètres géométriques ou physiques du système étudié. [15]

Notons :

- R la résistance du matériau constitutif de la structure.
- S les sollicitations imposées à la structure.

On peut écrire la marge de sécurité M et la fonction d'état limite G sous la forme générale :

$$M = G(R, S)$$

En se plaçant dans l'espace physique, espace formé par R et S , on remarque que la fonction d'état limite permet de diviser l'espace physique en 3 domaines (Figure I.10)

:

- $G(R, S) < 0$: domaine de défaillance.
- $G(R, S) = 0$: état limite.
- $G(R, S) > 0$: domaine de sécurité.

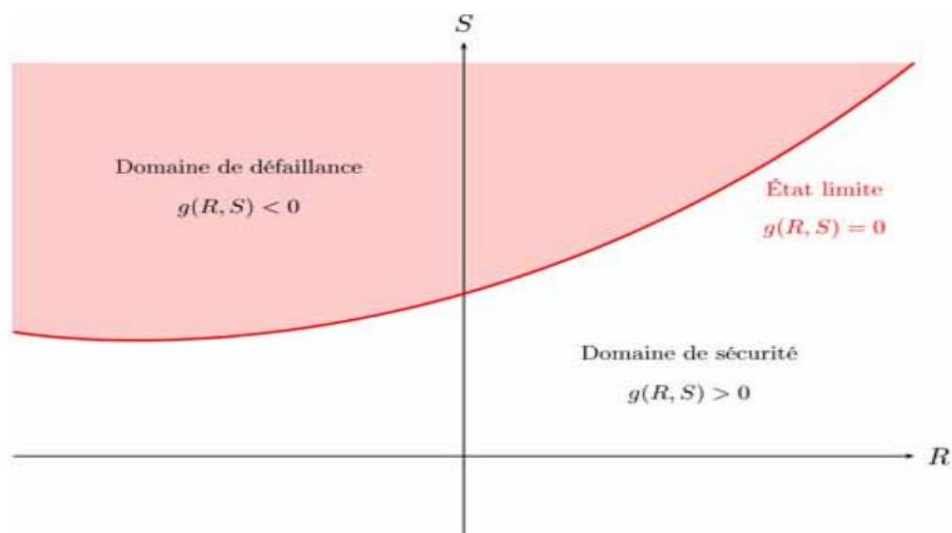


Figure I.7. Domaine de défaillance, état limite et domaine de sécurité.[15]

Notons que toutes les variables intervenant dans la fonction d'état limite ne sont pas nécessairement aléatoires, certaines pouvant être définies comme déterministes.

I.5.3. 2. Probabilité de défaillance et indice de fiabilité

Lorsque l'ensemble fondamental V est tout ou partie de l'ensemble des réels R , le concept d'événement aléatoire est remplacé par celui de variable aléatoire. On distingue usuellement :

1. les variables aléatoires discrètes pour lesquelles l'ensemble V est un ensemble discret de valeurs numériques (par exemple N ensemble des entiers naturels)
2. les variables aléatoires continues pour lesquelles l'ensemble V est un intervalle de R ou R tout entier. [15]

a. Probabilité de défaillance

La théorie de la fiabilité permet d'évaluer une probabilité de défaillance et de considérer les incertitudes associées aux différentes variables. L'approche probabiliste consiste à comparer, pour un élément de structure, la sollicitation appliquée S avec la variable de résistance R . Le critère lié à l'état limite se traduit par l'inégalité suivante. [16]

$$R \leq S \quad (I. 19)$$

Ces deux variables sont considérées aléatoires et peuvent être décrites par une fonction de densité de probabilité $f_r(r)$ et $f_s(s)$ comme le montre la (figure 10)

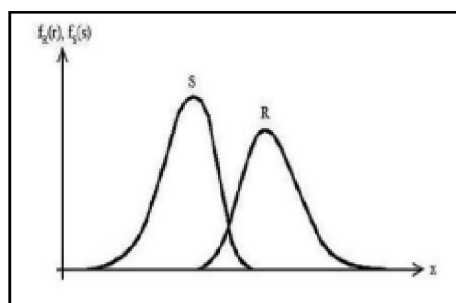


Figure I.8. Répartition d'une fonction de densité.[11]

b. Indicateurs de fiabilité

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

$$R = 1 - P_f \quad (I. 4)$$

Où P_f est la probabilité de défaillance (probabilité of failure) correspond à la probabilité d'avoir une valeur négative d'une réalisation de la fonction d'état G , on a donc :

$$P_f = P(G(\{X\}) \leq 0) \quad (I. 21)$$

L'indice de fiabilité noté β [17] est une mesure de la fiabilité, et il permet d'obtenir une approximation de la probabilité de défaillance. Il correspond à la distance euclidienne entre l'origine de l'espace normalisé et la surface d'état limite (c.-à-d. entre l'origine 0 et le point p^*). L'indice β est obtenu en résolvant le problème de minimisation suivant :

$$\beta = \|\mathbf{u}^*\| \quad (I. 22)$$

$$\beta = \min g\{x_i(u_j)\} \leq 0 \sqrt{\mathbf{u}^T \mathbf{u}} \quad (I. 23)$$

Sous contrainte $g(X) \leq 0$

p^* : Point de défaillance le plus probable, est le point de l'espace normalisé qui réalise ce minimum.

L'indice β est compté positif si le point d'origine appartient au domaine de sûreté, sinon il est négatif.

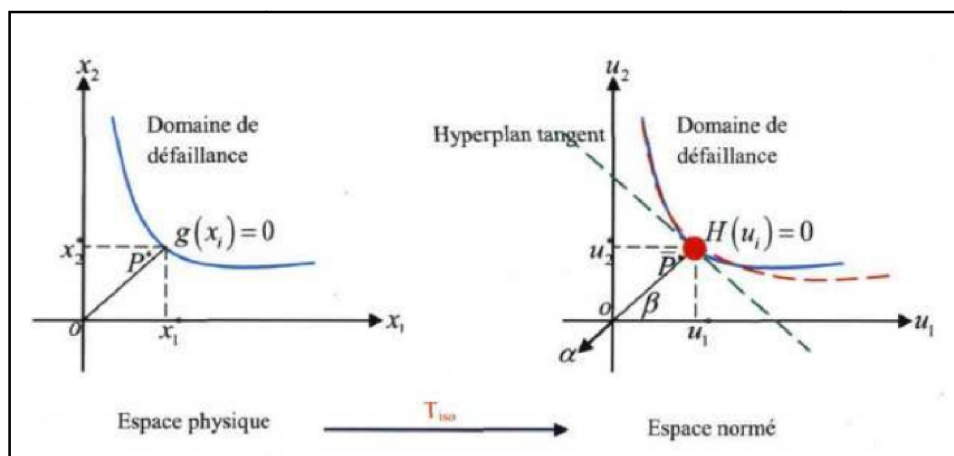


Figure I.9. Représentation du point de conception. [17]

Le point p^* est proportionnel au vecteur unitaire α^* , vecteur des cosinus directeurs, normal à la surface de défaillance en u^* , soit :

$$\mathbf{u}^* = \beta \cdot \alpha^* \quad (\text{I. 24})$$

Le point u^* est déterminé comme la limite d'une séquence $u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(m)}$. Le vecteur unitaire normal à la surface de défaillance définie par $H(u)$ au point $u^{(m)}$ est noté $\alpha^{(m)}$. Le vecteur $\alpha^{(m)}$ est au vecteur gradient en $u^{(m)}$ et dirigé vers le domaine de défaillance :

$$\alpha^{(m)} = - \frac{\nabla H(u^{(m)})}{\|\nabla H(u^{(m)})\|} \quad (\text{I. 25})$$

Cet indicateur de confiance constitue le résultat essentiel d'un calcul fiabiliste. Si l'on introduit la densité de probabilité conjointe $f\{X\}$ des variables aléatoires $\{X\}$ du modèle, la probabilité de défaillance s'écrit alors comme suit :

$$P_f = \int_{D_f} f\{X\}(\{x\}) \prod_{i=1}^k dx_i \quad (\text{I. 26})$$

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, 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 mécanique retenu.

Diverses méthodes de résolution ont ainsi été développées pour pallier ces difficultés. Classiquement, on distingue deux grandes familles :

- les méthodes basées sur des simulations
- les méthodes recourant à une approximation.

I.5. 4. Méthode d'analyse de fiabilité

I.5.4. 1. Méthode de simulation de Monte Carlo

En mathématiques, on appelle méthodes de Monte-Carlo les techniques permettant d'évaluer une quantité déterministe à l'aide de l'utilisation des tirages aléatoires [18]. C'est de cette idée de recours au hasard que vient la dénomination « Monte-Carlo », par allusion au célèbre quartier de Monaco réputé pour son casino [19].

La simulation de Monte Carlo (SMC) est considérée comme l'une des techniques les plus utilisées pour l'évaluation de la sécurité et du risque. Elle est reconnue comme une méthode d'ordre zéro puisqu'elle ne nécessite pas de calcul de dérivées. Néanmoins, c'est le moyen le plus coûteux mais certainement le plus fiable pour l'évaluation de la probabilité de défaillance.

Le principe de la méthode de Monte Carlo présentée dans la (Figure I.10) est basé sur la génération d'un grand nombre de tirages aléatoires. Pour chaque tirage, la fonction de performance est évaluée pour savoir si la configuration tirée se situe dans le domaine de sûreté ou de défaillance. La probabilité de défaillance n'est que le nombre de configurations défaillantes sur le nombre total de tirages.

La méthode de Monte Carlo est très robuste et constitue le moyen le plus sûr pour l'évaluation de la probabilité de défaillance. Néanmoins, cette méthode est très coûteuse en temps de calcul, surtout pour des systèmes réels avec de faible probabilité de défaillance, c'est-à-dire pour une probabilité de défaillance de 10^{-n} , il faut réaliser entre 10^{n+2} et 10^{n+3} tirages. [20]

Il existe plusieurs variantes de ces méthodes, visant à optimiser les stratégies dans le but de réduire le coût de calcul lié essentiellement au nombre d'appels du code de calcul aux éléments finis. Nous proposons tout d'abord de présenter la formulation sur laquelle se fondent toutes ces méthodes, puis de préciser quelques-unes d'entre elles.

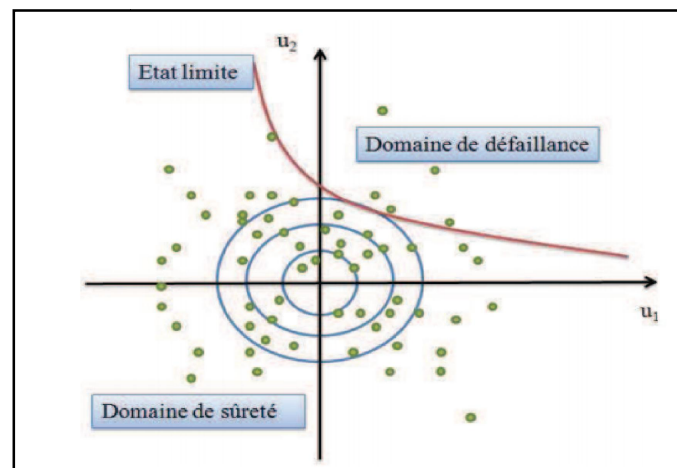


Figure I 10. Simulation de Monte Carlo dans l'espace standard.[20]

Selon Haldar et Mahadevan (2000b), la SMC est mise sous forme de six étapes :

1. définition du problème en termes de toutes les variables aléatoires.

2. modélisations des variables en fonction de leur FDPs.
3. Génération de n échantillons des variables aléatoires.
4. Évaluation du taux de défaillance en utilisant la fonction de performance pour chaque ensemble de valeurs produites de toutes les variables aléatoires.
5. Extraction des informations probabilistes à partir du nombre d'évaluations effectuées.
6. Détermination de la précision et de l'efficacité de la simulation.

I.5.4. 2. Méthode d'approximation

Les méthodes les plus connues sont les méthodes du premier et du second ordre FORM/SORM (First Order Reliability Method / Second Order Reliability Method), qui sont très efficaces pour le calcul de la fiabilité. Ces méthodes sont basées sur la recherche du point de conception, appelé aussi le point de défaillance le plus probable (MPFP : Most Probable Failure Point), dont la connaissance est à la base des approximations de la probabilité de défaillance dans le cadre de ces méthodes [21] ainsi que la détermination de l'indice de fiabilité β qui permet ensuite d'accéder à une valeur approchée de p_f .

Plusieurs définitions sont possibles pour β mais celle préconisée par Hasofer et Lind sont aujourd'hui la plus largement employée compte tenu de son invariance vis-à-vis de la représentation de la fonction de performance.

a. Méthode d'analyse de fiabilité de premier ordre

La méthode FORM consiste à approcher la fonction d'état limite par une fonction linéaire pour calculer de manière simple la probabilité de défaillance (figure I.14). L'approximation linéaire est un développement de Taylor au premier ordre au point de l'état limite, dont la densité de probabilité est la plus élevée. Dans cette approche au premier ordre, la surface d'état limite est approximée par un hyperplan tangent au point de fonctionnement MPFP (Most Probable Failure Point). L'approximation de la probabilité de défaillance P_f est donnée par l'expression [19]:

$$P_f = \Phi(-\beta) \quad (I. 27)$$

Où β est l'indice de fiabilité et Φ est la fonction de répartition normale centrée réduite.

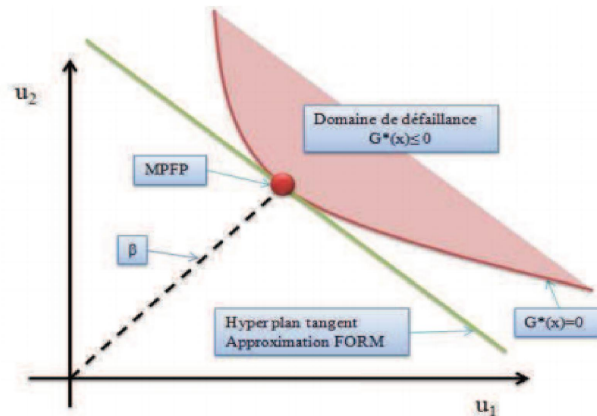


Figure I.14. Approximation FORM. [19]

Dans le cas où la fonction de performance est linéaire, et que les variables aléatoires sont Gaussiennes, la méthode FORM ($P_f = \Phi(-\beta)$) permet théoriquement d'obtenir la valeur exacte de la probabilité de défaillance. Mais la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite s'exprime sous la forme d'une intégrale dont il n'existe pas de solution analytique :

Elle peut être obtenue par intégration numérique, par des tables ou par des expressions approchées. [19]

A chaque itération de l'algorithme de recherche de point P^* , $n + 1$ appels à la fonction de performance sont nécessaires. L'ordre de grandeur du nombre d'itérations est de 10 et dépasse rarement 100. Il est raisonnable de dire que la méthode FORM nécessite moins de $N_a = 100(n + 1)$ appels à la fonction de performance (sans compter le coût de validation). En conséquence, la méthode FORM se classe parmi les méthodes économiques lorsqu'elle fonctionne, soit dans la plupart des cas.

- L'inconvénient de la méthode FORM est que l'approximation trouvée pour P_f peut être de mauvaise qualité. Il arrive que dans certains cas, la recherche du point P^* échoue ou bien qu'il y ait plusieurs points P^* à prendre en compte. Il est donc habituellement conseillé de valider les résultats par une méthode de simulations.

b. Méthode d'analyse de la fiabilité du second ordre

La méthode SORM permet d'approcher la fonction d'état limite par une forme quadratique homogène ou non homogène au point de conception.

Dans cette approche au second ordre, la surface de ruine est approximée par un hyperparaboloïde passant par le point de fonctionnement MPFP et ayant une même courbure en ce point. En donnant une meilleure probabilité de défaillance.

L'approximation de la Pf est évaluée asymptotiquement par :

$$P_f = \Phi(-\beta) \left(\prod_{i=1}^{n-1} \frac{1}{\sqrt{1+\beta k_i}} \right) \quad (I.28)$$

Où β est l'indice de fiabilité, et k_i sont les courbures principales de la fonction G au point MPFP.

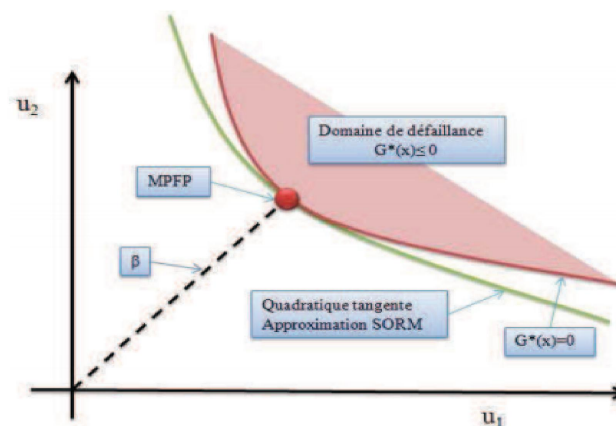


Figure I.15. Approximation SORM. [19]

I. 6. Application à la structure en béton confiné avec des matériaux composites.

La mise en évidence de l'importance dispersion des propriétés des matériaux composites a naturellement incité nombre d'autres à se tourner vers les méthodes de fiabilité pour leur analyse. Depuis les années 1980 surtout, les travaux en ce sens se sont en effet multipliés permettant une meilleure gestion des risques ainsi qu'une optimisation de ces structures.

Parmi ces études, on peut globalement distinguer deux grandes démarches :

Les approches microstructurales, plus attachées à l'aspect matériau, introduisent des critères de défaillance à l'échelle microscopique dont les paramètres limites sont aléatoires. Un critère local sur les constituants ou sur la rupture y suit une certaine loi de distribution (généralement de type Weibull), l'accès aux réponses locales étant

permis par un processus d'homogénéisation. La description de la rupture du matériau est ensuite basée sur la théorie du maillon le plus faible et sur une redistribution globale ou locale des efforts sur les éléments non rompus.

Les approches macroscopiques s'intéressent en revanche aux structures composites comme les stratifiés avec un critère de défaillance qui se rapporte à la réponse macroscopique de chacun des plis. Le caractère dispersif du comportement est introduit au travers des paramètres limites du critère, la fiabilité de la structure étant ensuite établie suivant un système série ou parallèle.

Dans les deux cas, l'objectif est d'accéder principalement à la probabilité de défaillance du matériau ou de la structure composite en fonction du changement appliqué. Si classiquement, les premières approches sont menées dans une optique de compréhension et de modélisation, les secondes visent quant à elles davantage la conception et l'optimisation de structures (à l'aide notamment des élasticités). Notons pour finir, qu'outre la variabilité précitée sur les paramètres limites du critère de défaillance (micro ou macro), les incertitudes introduites dans ces études portent sur le chargement, les dimensions des structures ainsi que sur les propriétés mécaniques macroscopiques (élastiques, plastiques, d'endommagement,...).[11]

I. 7. Conclusion

À travers ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes de la modélisation statistique ainsi que les méthodes de la fiabilité des structures.

L'approche probabiliste permet de mieux simuler l'état réel d'une structure que les approches déterministes, même si aujourd'hui ces dernières gouvernent les calculs dans les bureaux d'étude, en utilisant des coefficients partiels de sécurité qui prennent en compte tous les facteurs aléatoires.

II. 1. Introduction

Le béton est aujourd'hui le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, les performances mécaniques et la durabilité qu'il assure ont expliqué son utilisation pour réaliser divers ouvrages, notamment des bâtiments, des immeubles d'habitation, des ponts, des routes, des barrages, des centrales thermiques et nucléaires, etc. Cependant, comme tout matériau, le béton vieillit, évolue avec le temps et finit par subir des dégradations et causées par de nombreux facteurs. Compte tenu du coût des structures de génie civil ou le coût de réfection est parfois égal au double de celui la fabrication, il convient alors de chercher des méthodes de réhabilitation de ces structures pour augmenter leur durée de vie ou de les remettre en service.

De ce fait de nombreuses techniques de réparation durable et efficace du béton sont adoptables. Reposant sur une sélection appropriée des matériaux et de leur utilisation, ce choix n'est cependant pas la seule étape importante du processus, il faut porter une attention particulière à la réparation des surfaces, aux techniques d'application, au mûrissement de la réparation et au contrôle de la qualité.

En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à un matériau composite, qui fait l'objet de notre étude.

II. 2. Problématique du renforcement

Le projet d'une structure consiste à définir avec précision chacun des éléments qui la composent ainsi que la manière de la construire, le tout en accord avec son usage ou sa fonction finale. Le schéma de sa conception et, plus tard, de sa construction est toujours le même.

Si une structure est bien conçue et correctement accomplie, elle n'aura besoin d'aucun réconfort au moment de sa mise en service. Cependant, suite à des erreurs dans le projet ou dans l'exécution, ou suite à diverses circonstances lors de la vie en service, des renforts peuvent s'avérer indispensables. Ce changement de cas n'implique que la nouvelle structure, issue du « projet actualisé », soit plus exigeante que l'antérieure.

[21]

La réhabilitation des ouvrages en béton armé est appliquée pour des opérations de réparation ou de renforcement. La réparation vise à retrouver la performance initiale d'une structure endommagée avec des interventions du type local.

Les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas devant être considéré comme un cas particulier. Les plus fréquentes sont. [22]

- ✚ Endommagement partiel de la structure dû aux séismes.
- ✚ Dégâts dans la structure dus à d'autres agents, hors le séisme, comme la corrosion, la diminution de la section des armatures dans le béton et les incendies.
- ✚ Défaillance dans la réalisation de la structure, comme les armatures insuffisantes ou mal placées, mauvaise qualité des matériaux utilisés ou bien les dimensions des éléments structurels qui sont insuffisantes.
- ✚ Rénovation des structures anciennes dans le cas du vieillissement des matériaux avec une perte des caractéristiques initiales.
- ✚ Changement de la forme de la structure dans le cas d'une suppression de poteaux, de murs porteurs, ou l'ouverture de passages en dalles pour escaliers ou ascenseurs.
- ✚ Augmentations des charges qui sollicitent la structure (dues au changement d'usage de l'ouvrage).
- ✚ Demande d'amélioration des conditions en service, à savoir : la diminution des déformations, des flèches et des ouvertures des fissures ainsi que la réduction des contraintes sur les armatures.

Les objectifs du renforcement parasismique peuvent être de différentes natures : Augmenter la résistance aux efforts latéraux, augmenter la ductilité, ou encore combiner ces deux aspects afin de satisfaire aux nouvelles exigences de résistance aux séismes. [22]

II. 3. Le concept du renforcement

- ✚ Prend en compte la disposition choisie des éléments de construction porteurs ainsi que leur mode d'interaction.
- ✚ Décrit les dimensions les plus importantes, les propriétés des matériaux et les détails constructifs.

- ✚ Prend en considération les mesures constructives de sécurité et de protection contre le feu en fonction des situations de risque.
- ✚ Prend position par rapport au procédé de construction prévu.

Si le mode de fonctionnement du renforcement est essentiellement basé sur l'adhérence, la situation de risque « défaillance du renforcement » doit être traitée comme situation de projet accidentelle.

II. 4. Notion sur les techniques de renforcement classiques

Le choix d'une méthode de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic. Ce choix est tributaire des matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et des critères économiques. Dans ce paragraphe quelques notions sur les procédés classiques sont exposées. [21]

Les techniques plus anciennes, appelées techniques traditionnelles se résument à l'injection de résine, au remplacement des pièces endommagées et au chemisage en béton armé. [23]

Parmi les nombreuses procédures, on distingue:

a. Incorporation de profilés en acier :

Il s'agit de construire une structure parallèle à celle déjà existante qui supporte les charges. Ce type de structure demande beaucoup d'espace, il est seulement fiable pour de grands renforcements. [24]

b. Réparation par injection de résine :

L'injection de résine et les mortiers de résine est appliquée seulement pour la réparation des poteaux avec de petites fissures ou écaillages sans écrasement du béton ou flambement des armatures.

c. Collage d'éléments préfabriqués

Cette méthode nécessite des ouvrages spéciaux associés.

d. Addition d'armatures en acier sans augmentation de la section en béton

Cette technique est normalement employée pour le remplacement d'une ancienne armature, en cas de corrosion.

e. Collage de plaques en acier

Les plaques en acier sont souvent utilisées pour renforcer des éléments en béton armé comme des dalles et des poutres afin d'améliorer la résistance à la flexion, la rigidité, la capacité de déformation, et la ductilité, comme indiqué dans la (Figure II.4).

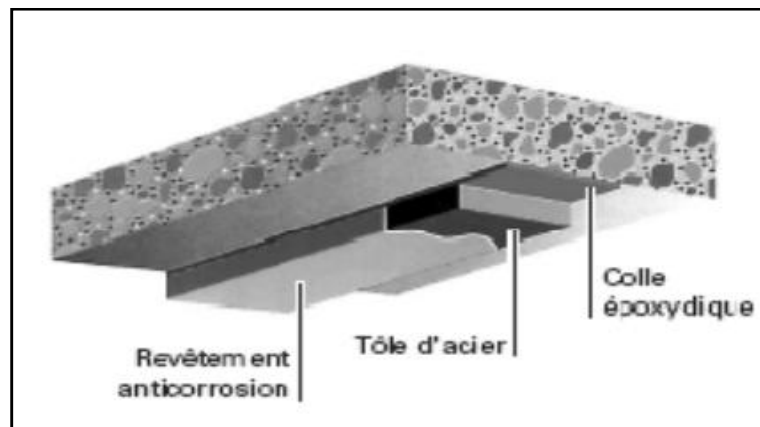


Figure II. 1.Application de pans métalliques selon le procédé d'Hermitte (Hamelin 2002). [21]

f. L'ajout des voiles en béton

Le renforcement par des voiles est l'une des techniques les plus répandues en Algérie, surtout après le séisme de Boumerdes en 2003. L'intégration de ces derniers dans les structures se réalise sur la périphérie en vue de réduire les effets de torsion et augmenter la résistance latérale (Figure II.4).



Figure II. 2. Renforcement des structures par l'ajout de voiles en béton armé. [21]

g. L'ajout des contreventements métalliques

De même que les structures en béton armé, les structures métalliques endommagées peuvent être renforcées en incorporant des contreventements métalliques de différentes formes, afin de mieux maintenir les éléments structuraux, d'augmenter leur capacité horizontale. Sa facilité de mise en œuvre permet le renforcement global de la structure. Ce type de renfort présente l'avantage de permettre des ouvertures à la structure (Figure II.5).



Figure II. 3. Renforcement des structures par l'ajout des contreventements métalliques (Fardis 2009). [21]

II. 5. Techniques de renforcement modernes

Actuellement, il existe des techniques ultramodernes pour la réhabilitation des bâtiments. Un aperçu sur quelques techniques destinées au renforcement des colonnes en béton armé sera exposé, afin de montrer l'ampleur de ces méthodes.

a. Renforcement par chemisage en acier

Le chemisage en acier est plus utilisé pour le renforcement des éléments structuraux endommagés malgré leur coût élevé par rapport au béton armé. Cette technique présente plusieurs avantages comme la simplicité et la facilité de mise en œuvre.

b. Renforcement par précontrainte transversale

Elle permet, en effet, d'appliquer des efforts d'une intensité connue, en des points et suivant des directions bien définies, capables de s'opposer aux efforts générateurs des désordres (Figure II .6). Elle est qualifiée d'additionnelle lorsqu'on l'applique à des ouvrages existants pour augmenter leur capacité portante ou prolonger leur durée d'exploitation.[25]

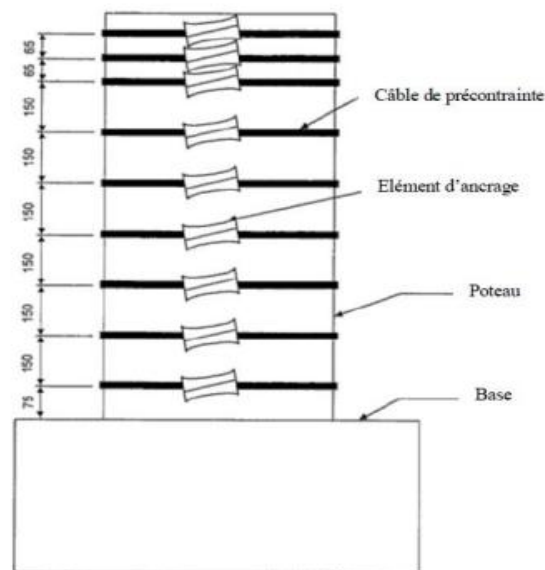


Figure II. 4. Renforcement par précontrainte. [21]

c. Renforcement par matériaux composites

Cette technique est plus efficace pour l'augmentation de la résistance des éléments structuraux. Son application est relativement simple, très peu dérangerante pour les utilisateurs et peu exigeante en main d'œuvre.

Actuellement, les matériaux composites appartenant à la famille des polymères renforcés de fibres « PRF » conviennent pour une gamme très étendue d'utilisations dans le domaine de la réhabilitation des constructions. Ceci s'explique notamment par la diversité des formes dans lesquelles ils peuvent se présenter : feuilles, tissus ou enveloppes préformées, collés sur les parois extérieures de la structure (moulage au contact), sous forme d'engravure, de profilés structuraux. Cette technique est plus efficace pour l'augmentation de la résistance des éléments structuraux. Ça fera ainsi l'objectif de notre étude.

II. 6. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice. [21]

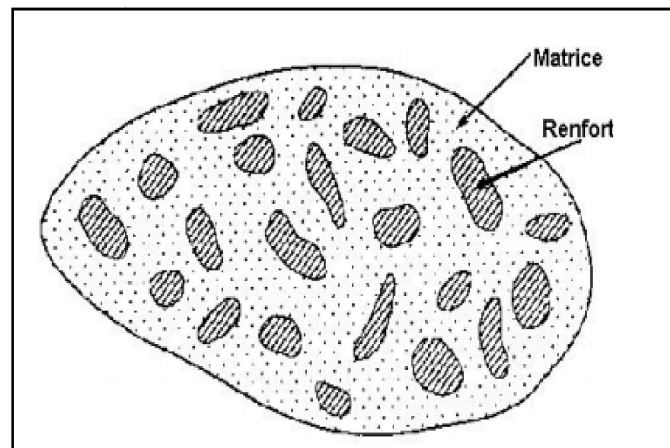


Figure II. 5. Schéma illustratif d'un matériau composite. [26]

II.7 Eléments constituant un matériau composite

Un matériau composite est constitué de deux phases :

Une phase continue qui est la matrice, une phase discontinue qui le renfort.

II.7. 1. La matrice

La matrice est, avec les renforts, l'un des deux principaux constituants des matériaux composites. C'est le terme désignant la résine polymérisée dont le rôle est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts. La matrice est généralement homogène et isotrope [26].

II.7. 2. Le renfort

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine ; son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, et qui se présente, généralement, sous forme de fibres.

II. 8. Classification des matériaux composites

Les matériaux composites se classent, suivant la nature de la matrice et la forme de la fibre. D'après la matrice on distingue les matériaux composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Selon la forme des renforts les composites se particularisent par les composites à fibres et les composites à particules.

II.8. 1. Suivant la nature des matrices

a. Matrices thermodurcissables

Les matrices thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces dernières ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyester insaturées, les résines de condensation et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables.

b. Matrices thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont dures et solides qui nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.

c. Matrices métalliques et céramiques

Ce sont des matrices à hautes températures, cette matrice ne peut être associée qu'à des fibres réfractaires de type SiC ou des fibres de carbone. Le coût de fabrication de ces matériaux est très onéreux. Un adhésif est nécessaire pour coller le matériau composite sur une surface.

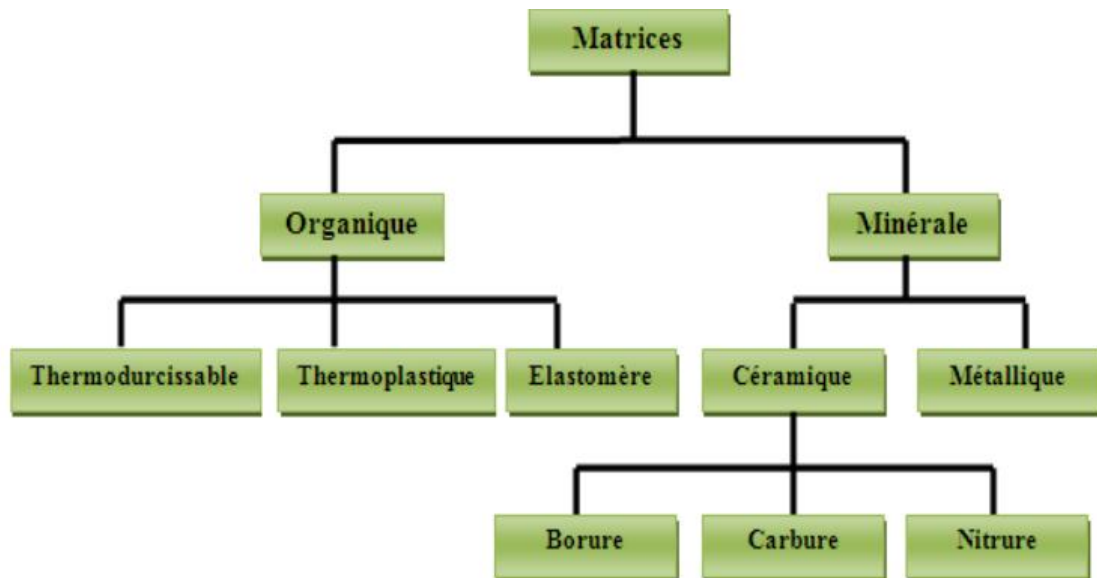


Figure II. 6. Différents matériaux de matrice. [31]

II.8. 2. Suivant la forme de la fibre

II.8.2. 1. Les composites à fibres

Constitués de fibres continues ou discontinues (fibres coupées ou courtes). Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes [26].

On distingue principalement deux types de fibres appliqués dans le secteur du bâtiment :

a. Fibres synthétiques

- Fibre d'aramide

Les fibres aramides, dont la plus connue est le Kevlar, ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les fibres de carbone, mais leurs résistances à la compression sont faibles. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice.

- Fibre de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. La qualité finale des fibres de carbone dépend fortement des qualités du précurseur. Le brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole, est utilisé pour produire des fibres de carbone.

- Fibres céramiques

Divers fibres de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, nitrures, etc.) peuvent être élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Les fibres céramiques présentent une bonne stabilité des propriétés jusqu'à des températures de 1200°C à 1600°C.

Actuellement les fibres céramiques sont essentiellement utilisées avec des matrices métalliques ou des matrices céramiques, conduisant à des matériaux composites de coûts très élevés, utilisés pour les aubes de compresseur et les turbines.

- Fibre de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix, qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites. Ces dernières présentent un module de traction faible, mais une résistance en traction intéressante. Elles sont constituées de silicate de diamètre de 10 µm et considérées comme des matériaux orthotropes.

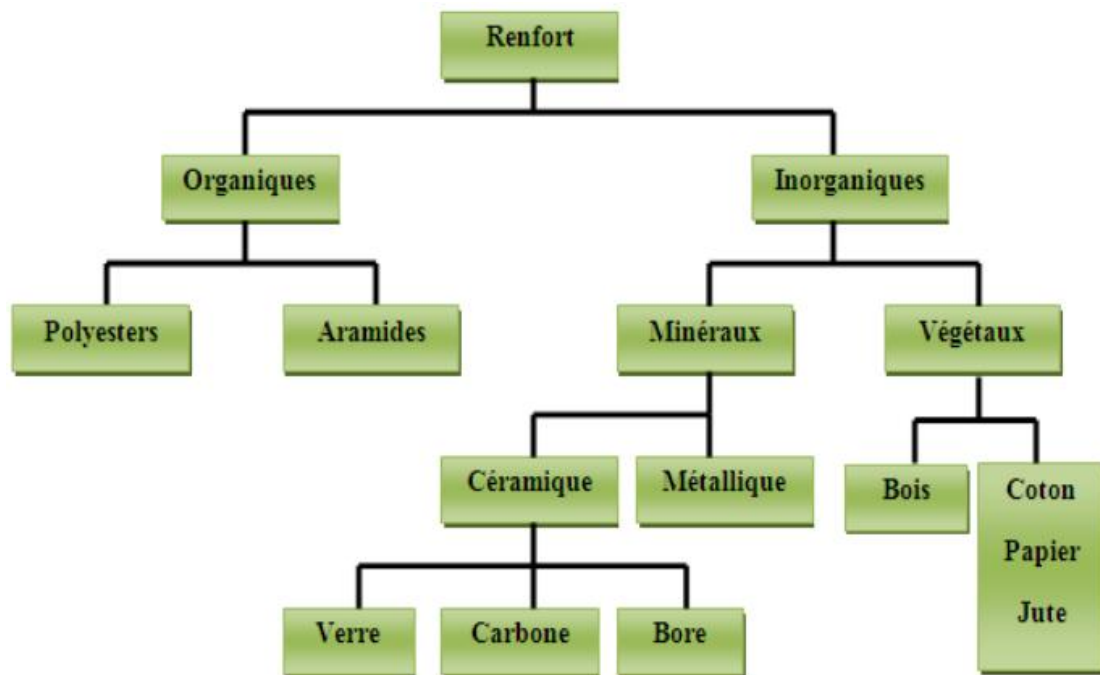


Figure II. 7. Différents matériaux de renfort.[31]

b. Fibres naturelles

Plusieurs ressources en fibres naturelles ont été explorées au fil du temps pour l'industrie textile. L'utilisation des fibres naturelles au niveau industriel permet de réduire le coût et le poids des pièces, et d'améliorer les perspectives de recyclage et d'impact environnemental, en particulier sur l'application automobile.

Dans le domaine du bâtiment, l'intérêt est économique et technique avec des niveaux d'isolation thermique largement supérieurs aux matériaux courants. D'ailleurs elles sont utilisées pour l'étanchéité dans le chauffage sanitaire.

Les fibres naturelles sont d'origine animale ou végétale. Les plus utilisées sont les fibres de coton, lin et chanvre, ou encore de sisal, jute, kenaf ou coco (Figure II.8) Elles sont plus répliquées ces dernières années du fait de leur souplesse et de leur résistance en environnement agressif.

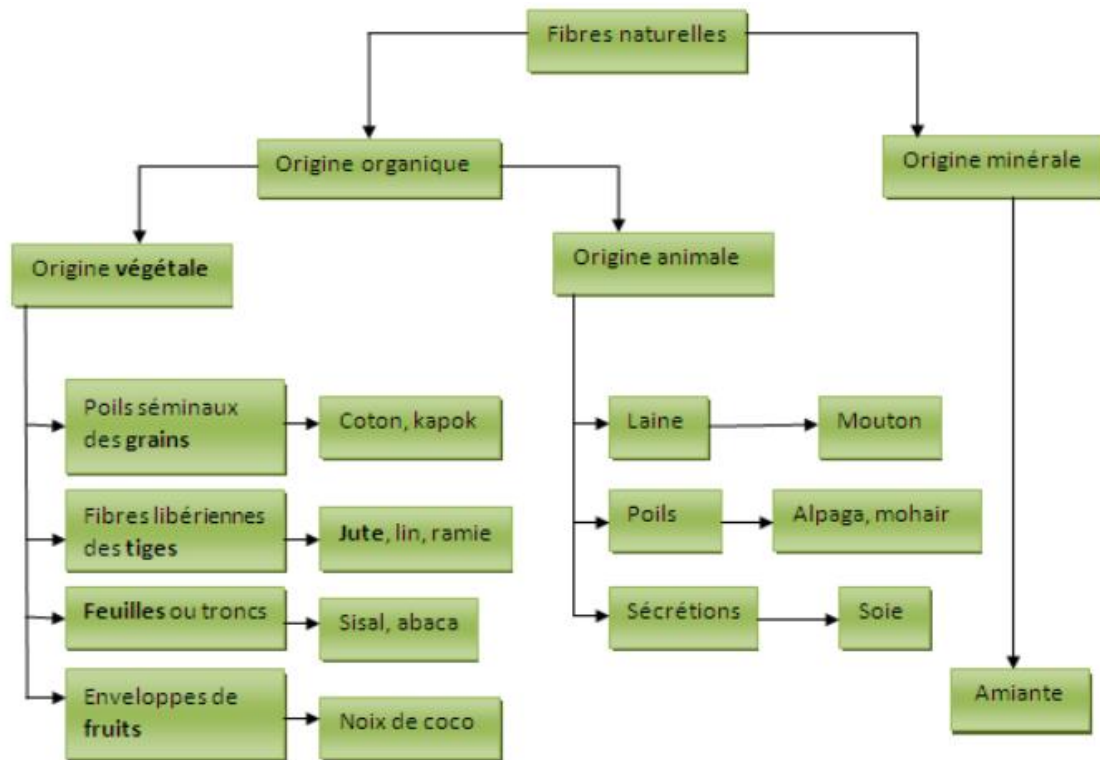


Figure II. 8. Différentes fibres naturelles.[31]

II.8.2. 2.Composites à particule

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux. [26]

II. 9. Type de matériaux composites

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes classes: les composites à grande diffusion et les composites à haute performance.

II.9. 1. Composites à grande diffusion

Ils occupent une portion de 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort est de 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes.

Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters avec des fibres de verre. Dans ce cas le renfort et la matrice sont à des coûts voisins. [21]

II.9. 2. Composites à haute performance

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux, contrairement aux composites à grande diffusion. Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développées pour les composites à haute performance. [21]

II. 10. Caractéristiques des matériaux composites

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort
- de leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- le gain de masse,
- la bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- l'absence de corrosion,
- l'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- l'insensibilité à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, pétroles,...)
- tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- très forte anisotropie. [26]

II. 11. Domaine d'application

Les bonnes performances mécaniques des matériaux composites en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux intéressants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux demeure dans leur anisotropie simplement observable par le constructeur qui peut ainsi associer la rigidité et la résistance en fonction des excitations extérieures.

Ainsi, l'avantage continu des matériaux composites est de pouvoir être rénové pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette réhabilitation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant, leur coût de fabrication reste élevé. On note ainsi que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

Leurs domaines d'application :

- électricité et électronique,
- bâtiment et travaux publics,
- transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- santé (instrumentation médicale),
- sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, aviron, etc). [26]

II. 12. Application des composites en génie civil

Les matériaux composites les plus utilisés en techniques de bâtiment et de travaux publics sont les polymères renforcés de fibre « PRF ».

Un PRF est un matériau composite de synthèse fortement orthotrope dont les caractéristiques dépendent, de l'orientation et de la proportion en volume des fibres et de la matrice.

Le terme « polymère renforcé de fibre » désigne « composite amélioré », il est généralement employé pour désigner les fibres synthétiques telles que, les fibres de verre, les fibres de carbone et les fibres d'aramides noyées généralement dans une matrice (résine époxy, ou vinylester).

La technologie du renforcement, réparation et confinement des éléments structuraux porteurs par les polymères renforcés de fibres « PRF » est l'une des techniques les plus encourageantes pour améliorer la résistance, la rigidité et la ductilité. Leur

application est relativement simple, très peu agressive pour les utilisateurs des ouvrages renforcés et peu laborieuse en main d'œuvre.

Elle représente ainsi l'une des solutions les plus rentables en matière d'accroissement de la résistance des ouvrages existants. Par exemple la résistance de la fibre de carbone aux différentes matières chimiques et ses caractéristiques non corrosives donnent aux différents systèmes de renforcement, une durée de vie bien plus longue que celle des matériaux ordinaires, tel que l'acier, C'est-à-dire, une valeur plus économique à long terme. [27]

D'une manière générale, les matériaux composites «PRF» présentent des avantages immenses dès qu'il s'agit de la protection, la réparation et le renforcement d'ouvrages ou d'éléments d'ouvrages en béton armé, tels que : les poutres, les poteaux, les dalles et les ouvrages d'art.

Les composites de fibres possèdent habituellement un rapport résistance-poids plus élevé que celui des matériaux de construction conventionnels tels que l'acier, et une excellente résistance à la corrosion. Ces matériaux ont initialement été développés pour les industries aérospatiales et de la défense. C'est la hausse de la demande des matériaux de construction efficaces et durables qui entraîne une plus grande utilisation de ces matériaux composites améliorés dans les constructions civiles. De récentes recherches et tentatives de développement ont révélé que ces matériaux permettraient de renforcer plusieurs structures en béton armé existantes. Les lamelles en polymère renforcé de fibres collées à l'extérieur, ont été introduites en Allemagne et en Suisse vers le milieu des années 80 comme solution de rechange au procédé consistant à renforcer les poutres en béton à l'aide de tôles d'acier. Dans le secteur de la construction, les lamelles en composite sont désormais préférées aux tôles en acier car elles sont plus faciles à utiliser et offrent plus de possibilités. Tandis que les tôles sont des matériaux plus appropriés aux surfaces plates et aux poutres, les lamelles en composite sont plus efficaces sur les surfaces rondes, telles que les poteaux, ou les surfaces plus larges, telles que les murs.

II. 13. Notion de confinement

En pratique, l'état des contraintes en compression triaxiale dans les poteaux en béton armé, est équivalent à la résultante d'une pression hydrostatique lorsque les armatures

transversales en forme de cadres fermés ou de spirales continues empêchent le gonflement latéral des matériaux de l'élément soumis à une compression axiale. [20]

Le béton subissant cette action favorable des armatures transversales est appelée béton confiné. [28]

Le confinement du béton comprimé peut être réalisé aussi bien par des cadres carrés ou rectangulaires fermés qui produisent une pression latérale aux coins des cadres comme le montre la (Figure I.a), que par des spirales continues très efficaces grâce à la distribution continue des contraintes latérales du confinement le long de la circonférence entière comme le montre la (Figure I.b). En outre, il donne une dilatation latérale du béton enclos par les cadres en produisant une déflexion en dehors du côté des cadres où les parties résidantes dans la section en forme de flèche seront très larges que les sections entre les cadres, comme le montre la (Figure I).

L'utilisation de PRF en tant que renfort externe pour les structures en béton, telles que les colonnes, est très répandue en Europe, au Japon et en Amérique du nord. Des colonnes de 38 bétons ont été déjà renforcées avec succès en utilisant des enveloppes PRF, cependant, les PRF sont employées dans les nouvelles constructions, impliquant le confinement des colonnes en béton. La recherche a prouvé que les tubes de PRF ont le potentiel de remplacer l'acier conventionnel. L'action de confinement du tube est créée par la contrainte passive à la dilatation transversale du béton sous la compression uniaxiale. Le tube de PRF met le béton sous la compression triaxiale, un effort qui augmente la résistance à la compression du béton confiné par suppression des fissures initiales dans le noyau du béton. Des tubes préfabriqués de PRF peuvent être utilisés en tant que coffrage permanent pour confiner des colonnes et pour agir en tant qu'enveloppe protectrice contre les effets de l'environnement durs. Ainsi les avantages potentiels d'employer les PRFs pour confiner le béton sont tout à fait attractifs à plus d'un titre.

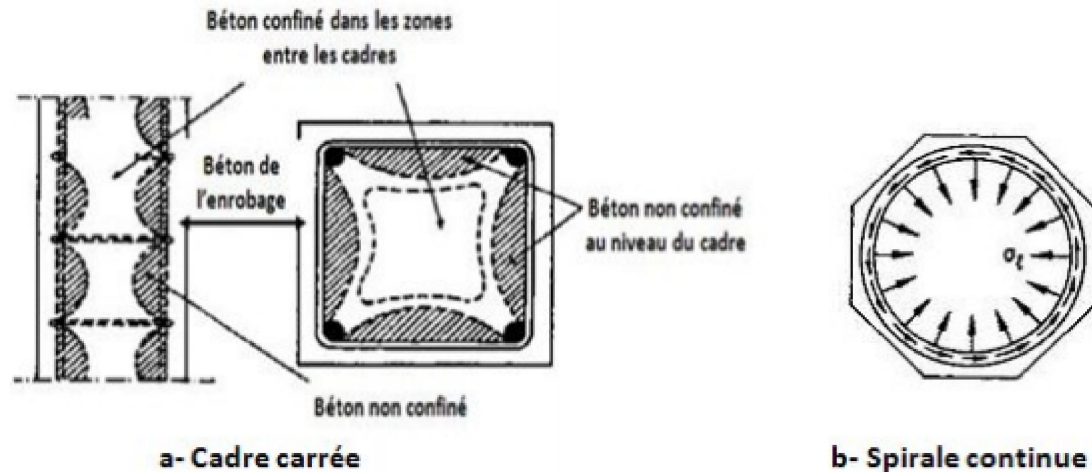


Figure II. 9.Exemple de confinement d'un poteau. [28]

II. 14. Principe du confinement

C'est une autre appellation du béton armé renforcé par des armatures transversales ou par jaquette externe qui exercent des pressions latérales sur le béton. Les études récentes ont prouvé que le comportement du béton en compression dépend de sa richesse en confinement ; généré par une disposition adéquate des armatures transversales ou une épaisseur conséquente de la jaquette externe. Il en résulte par voie de conséquence un accroissement important de la résistance en compression ainsi que la déformation correspondante. [27]

II. 15.Types de confinement

Actuellement, le confinement est une méthode efficace pour augmenter la capacité portante des sections en béton armé ou en béton de fibres ; on distingue deux types de confinement à savoir :

a. Le confinement interne

Le confinement interne se fait par des cerces en aciers ou spires dans le cas des sections circulaires et des cadres ou étriers transversaux dans le cas des sections rectangulaires.

Le confinement interne du béton peut être aussi réalisé avec des fibres de carbone ou de verre ainsi que les fibres de polypropylène ou encore les fibres d'aramide. Le

Béton confiné ne sera pas considéré comme une structure, mais en tant que matériau multiple (composite), qui sera défini par les propriétés globales. [27]

b. Le confinement externe

Le confinement latéral est une méthode bien connue pour augmenter la capacité des colonnes renforcées afin de porter les charges. Dès 1929, Richart et al. ont prouvé qu'une contrainte de compression latérale peut mener à un perfectionnement significatif de la résistance à la compression du béton. [20]

Le confinement externe peut être fourni par divers moyens, tels que ; les jacketes, les cercles, l'emballage en acier de FRP (Fibre reinforced polymer) autour de la colonne ou par tubes en acier (CFST : Concrete filled steel tubes); de nombreux modèles analytiques sont proposés pour prédire un tel confinement.

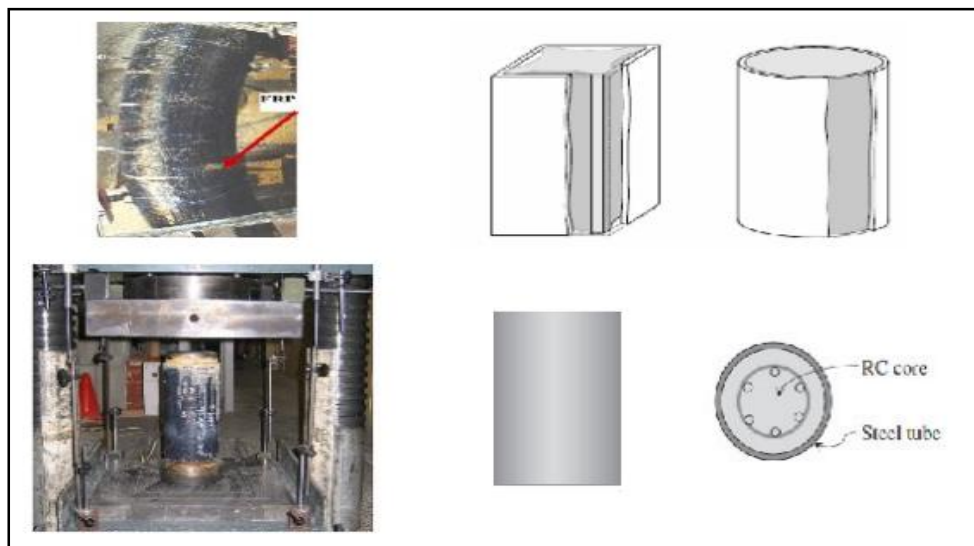


Figure II. 10. Béton armé confiné par PRF et tube en acier.[20]

Dans le cas du confinement externe par tube en acier par exemple, aux premières phases du chargement, le coefficient de Poisson du béton est inférieur à celui de l'acier, et le tube en acier n'a aucun effet sur le noyau béton. Par conséquent, l'expansion latérale du béton devient graduellement plus grande que celle de l'acier. Une pression radiale se développe à l'interface acier et le retenant ; de ce fait le noyau béton en développant une tension circulaire dans le tube (Figure II.3).

À ce stade, le noyau béton est soumis aux contraintes triaxiales et le tube en acier aux contraintes bi axiales, de sorte qu'il y ait un transfert de charge à partir du tube au

noyau, comme le tube ne peut pas soutenir l'effort de flexion longitudinalement en présence d'une tension circulaire. La charge correspondante à ce mode de rupture peut être considérablement plus grande que la somme de celle de l'acier et du béton, mais la rupture de cisaillement peut intervenir avant que le transfert de charge ne soit complet [21].

II. 16. Quelques techniques du confinement avec des FRP

Différentes techniques ont été développées pour renforcer des structures existantes en béton en utilisant des composites « PRF ». Les méthodes de renforcement peuvent être classées dans trois catégories à savoir la stratification au contact, l'enroulement filamentaire et le chemisage par coquille préfabriquée en « PRF ».

a. Stratification au contact

Sur chantier, la stratification au contact (stratification directe) est la technique la plus utilisée pour le renforcement des colonnes en utilisant les composites «PRF». Dans cette méthode, les draps de fibres unidirectionnelles ou tissées sont imprégnés de résines de polymère et enveloppés, ensuite autour des colonnes dans un processus de moulage au contact (Figure II.11) avec orientation des fibres principales dans la direction de confinement. [29]



Figure II. 11. Stratification au contact (WBAC 2003). [28]

Une colonne peut être enveloppée complètement par des tissus «PRF» avec une ou plusieurs couches (Figure II.12). Elle peut être aussi partiellement enveloppée en

utilisant des lanières «PRF» sous forme d'une spirale continue ou des anneaux discrets

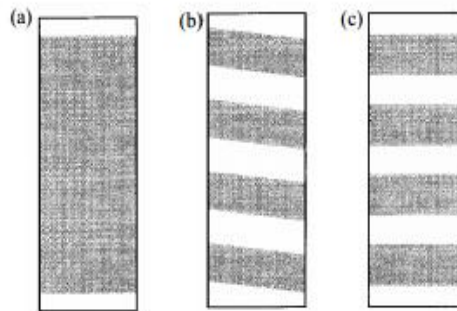


Figure II. 12. Les méthodes typiques d'envelopper le «PRF» pour les colonnes en B.A. [29]

- (a) enveloppée totalement en utilisant des tissus «PRF».
- (b) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «PRF» en spirale continue ; et
- (c) partiellement enveloppée en utilisant des lanières «PRF» sous forme d'anneaux discrets.

L'amélioration de la force de compression du béton suite au confinement externe avec «PRF», a été démontrée en premier par. Ce concept a été appliqué pour la première fois au renforcement de vraies colonnes en B.A au Japon au milieu des années 1980. Depuis, il y a eu beaucoup de rapports sur l'application de cette technique dans le renforcement des colonnes des ponts ou des constructions civiles.

b. Enroulement filamentaire

Le principe de l'enroulement filamentaire est semblable à celui de la stratification directe, sauf que la technique de l'enroulement filamentaire utilise la fibre continue au lieu des tissus ou des lanières, afin que l'enroulement des filaments puisse être traité automatiquement au moyen d'une machine contrôlée par ordinateur (Figure II. 13). Une telle technique permet la précision de l'épaisseur du «PRF», l'orientation de la fibre et le control de la fraction du volume ce qui mène à une meilleure performance. L'idée de confiner le béton par enroulement de fibres continues imprégnées par la résine a été mentionnée pour la première fois par. [29]

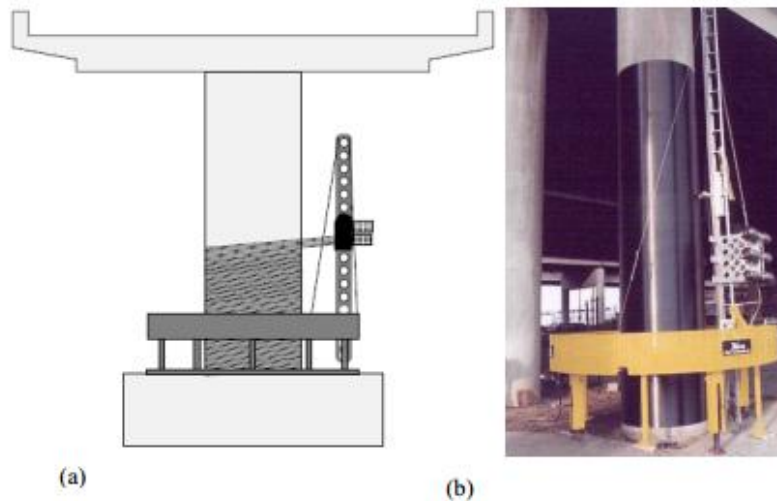


Figure II. 13. Enroulement filamentaire ((a) Monti 2003, (b) Master Builders, Inc. And structural preservation systems 1998, balaguru et al. 2009) [28]

c. Chemisage par coquille préfabriquée en «PRF»

Les colonnes et poteaux en B.A peuvent aussi être renforcés en utilisant des chemises en «PRF» sous forme de coquilles préfabriquées. Les coquilles sont fabriquées sous conditions contrôlées en utilisant la fibre en voile ou bandes avec imprégnation de résine, effectuée avant l'installation (figure II.14). Elles peuvent être fabriquées en demi-cercles ou demi-rectangles, en cercles avec une fente ou en rouleaux continus, afin qu'elles puissent être ouvertes et placées autour des colonnes. Pour un confinement efficace, un contact total entre la colonne et la coquille en «PRF» est essentiel. Cela peut être assuré soit en liant la coquille à la colonne par adhésifs ou en injectant un coulis ou mortier de ciment dans l'espace entre la coquille et la colonne.



Figure II. 14. Chemisage par coquille préfabriquée « PRF ».[28]

Une application intéressante des coquilles préfabriquées en «PRF» est de les utiliser dans les travaux de modification de forme des colonnes comme partie des mesures de renforcement. Les travaux menés sur ces dernières ont suggéré que les colonnes carrées ou rectangulaires peuvent être renforcées en les reformant dans des colonnes circulaires ou elliptiques dans lesquelles une coquille préfabriquée en «PRF» est utilisée. Cela permet de fournir à la fois la forme au béton supplémentaire et le confinement exigé après le durcissement du béton.

II. 17. Renforcement de quelques éléments de la structure

Les polymères renforcés de fibre FRP (Fibre reinforced polymer) sont maintenant très utilisés pour une variété d'applications. Ils sont particulièrement attrayants pour le renforcement et la réadaptation des structures en béton. Il est prouvé qu'ils sont souvent utilisés pour le confinement des colonnes en béton. En effet, de nombreuses études ont clairement démontré qu'envelopper avec des feuilles de FRP des colonnes circulaires est une technique très efficace pour augmenter leur résistance et leur ductilité. [28]

a. Renforcement des poteaux

L'utilisation d'une enveloppe formée de feuilles de PRF autour de la colonne permet non seulement d'assurer une protection supplémentaire, mais aussi d'améliorer la résistance en compression par l'effet du confinement produit par les fibres du composite en plus d'une augmentation de ductilité très significative comparativement à la colonne sans composite (Figure II.6).



Figure II. 15. Poteau circulaire en BA confiné par matériaux composites. [28]

b. Renforcement des poutres

On peut effectuer un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface tendue de la poutre, et le renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les parois de ces mêmes poutres (Figure II.17).



Figure II. 16. Poutres en BA renforcées par matériaux composites.

c. Renforcement des dalles

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalles en béton armé (Figure II.18). Elles sont ancrées dans le béton elles sont introduites dans des encoches remplies de mortier et d'époxy.

Les bandes de composite augmente considérablement la charge ultime des dalles soumises au poinçonnement et confère une meilleure répartition des fissures.

Comparativement aux dalles de référence, celles confinées développent un mécanisme flexionnel, qui conduit à un mode de rupture plus ductile. [30]



Figure II. 17. Tablier de pont en BA renforcé par matériaux composites. [30]

d. Renforcement des murs

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartement de six étages à Zurich, en Suisse. Etant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en bâtiment à bureau avec certaines modifications au niveau de son système de résidence latérale, le système structural a donc été réévalué. Parmi ces changements, des murs non renforcés conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et ceux restant devaient reprendre une charge beaucoup plus grande. L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. On a collé des plaques de fibres de carbone en forme de X pour chacun des étages. Un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhésion entre les fibres et le mur. Avec les composites la ductilité, du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables [27].

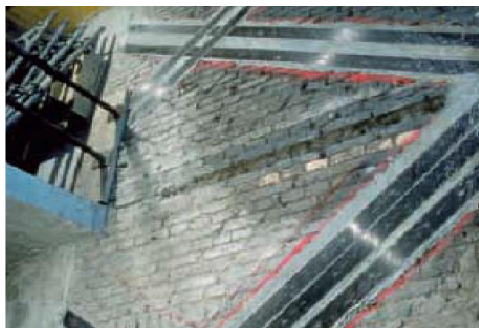


Figure II. 18. Confinement des murs avec des PRF. [27]

II. 18. Les avantages du confinement par les composites PRF

- ✚ la résistance, la ductilité et la déformation d'un béton renforcé sont plus élevées,
- ✚ la flexibilité des composites permet de confiner des colonnes de différentes géométries,
- ✚ Le poids de l'élément renforcé par les composites est peu modifié, vu la légèreté des composites
- ✚ l'enveloppe de composites ne modifie pas l'apparence des colonnes ou des structures.
- ✚ Certains composites résistent très bien aux variations de température, aux cycles de gel dégel et à l'humidité.

II. 19. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mis en évidence les avantages du renforcement des structures par matériaux composites ainsi que les techniques d'applications concernant ce sujet.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils portent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés. Ils offrent une meilleure isolation thermique, et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions.

III. 1. Introduction

Dans différents domaines de l'ingénierie, notamment l'aéronautique, l'industrie nucléaire ou l'industrie automobile, l'étude de nouveaux matériaux nécessite l'utilisation des statistiques et des méthodes probabilistes pour prendre en compte la variabilité de leurs performances ultimes, afin de définir les facteurs de sécurité.

Après avoir fait une synthèse sur les différentes étapes du calcul fiabiliste, et du confinement des structures avec les matériaux composites, nous proposons dans ce troisième chapitre une analyse probabiliste pour évaluer la fiabilité de cylindres en béton confinés avec des polymères renforcés de fibres de jute, en compression.

La probabilité de défaillance et l'indice de fiabilité sont ainsi calculés en tenant compte de la variation de l'effort appliqué. La méthode utilisée est la méthode d'approximation FORM, en définissant d'après le modèle déterministe, la fonction d'état limite et en réalisant une étude statistique des paramètres variables, un programme de calcul est établi en utilisant le logiciel « R ».

III. 2. Modèle utilisé

III.2. 1. Contexte déterministe

Cette approche fiabiliste a été découpée en deux parties principales : une approche déterministe et une approche probabiliste.

La première partie, qui traite du cas déterministe, est divisée en une partie qui traite de la fonction résistante (**f_r**) des éprouvettes en béton renforcées par le collage de bandes en FRPJ sur la face collatérale, par rapport à l'effort de compression appliqué et une deuxième partie, qui décrit la fonction sollicitante (**f_s**) de ces éléments.

Ces deux situations seront indispensables pour définir le scénario de défaillance pour l'approche probabiliste. [30]

Il est à rappeler que notre étude est basée sur une expérience, menée par, sur une série d'éprouvettes en béton confinées avec deux bandes en PRFJ formant deux hélices de sens contraire (dextre et senestre). Les éprouvettes ont été testées en compression sous un chargement uni axial jusqu'à la rupture, (Figure III.1).

Les résultats obtenus dans cette étude, ont fournis la base de données de la régression linéaire que nous avons calculée. Un lien linéaire a ainsi, été établi entre la résistance

à la compression du béton confinés et les paramètres de confinement qui sont la largeur de la bande de PRFJ, le pas de l'hélice qu'elle forme autour du cylindre et la résistance à la traction du composite.



Figure III. 1. Essai d'écrasement sur le béton confiné avec PRFJ.[31]

La Fonction de résistance est représentée par le modèle qui est calculé en se basant sur le modèle de Mander et al. Tel que :

$$f_{cc} = f_{c0} + kf_1$$

(III. 1)

Où f_{c0} : résistance du béton non confiné.

f_1 : Pression du confinement.

Dans notre cas, f_1 est donnée par la formule

$$f_1 = \frac{4 \cdot f_{frp} \cdot t \cdot L}{D \cdot S}$$

(III. 2)

Avec

f_{frp} : Résistance du FRP (polymère renforcé de fibre)

t : Épaisseur du PRF.

L : Largeur de la bande.

D : Diamètre de l'éprouvette.

S : Pas de l'hélice.

La fonction de résistance aura comme forme :

$$f_{cr} = 16.89 + \frac{28.484 \cdot f_{frp} \cdot t \cdot L}{D \cdot S}$$

(III. 3)

La fonction des sollicitations, quand à elle, est définie par le chargement extérieur appliqué :

$$f_{cs} = F/A$$

(III. 4)

III.2. 2. Contexte probabiliste

Contrairement à l'approche déterministe, où des valeurs uniques (les moyennes) sont attribuées aux grandeurs, l'approche probabiliste prend en compte la variabilité des matériaux et des sollicitations en représentant une grandeur par la loi de distribution de sa valeur (densité de probabilité de la variable aléatoire).

Les variables seront représentées alors selon une loi de densité de probabilité normale. L'étude des variabilités sur des ouvrages en béton armé [32, 33] semble montrer que cette distribution est adéquate pour représenter statistiquement leurs caractéristiques. La distribution normale est définie par deux paramètres : la moyenne (μ) et l'écart type (σ). La valeur de la moyenne sera celle qui a été utilisée dans le procédé expérimental ou qui est inhérente au matériau, tandis que l'écart type sera calculé pour un coefficient de variation de 10%.

Selon l'approche probabiliste, un ouvrage n'est réputé sûr si sa probabilité de défaillance, P_f , est inférieure à une valeur donnée à l'avance, la probabilité cible : P_f cible (risque de défaillance acceptable). Si R et S représentent respectivement la résistance et la sollicitation d'un élément de structure, la défaillance de l'élément est liée au dépassement de la résistance par la sollicitation.

La valeur de la probabilité cible est conditionnée par de nombreux facteurs, variant selon l'ouvrage, ses caractéristiques d'implantation et ses propriétés de service.

Pour appliquer l'approche probabiliste à notre système mécanique, (éprouvettes en béton renforcées par des composites PRFJ), des hypothèses, des principes et des scénarios de défaillance doivent être formulés.

a. Hypothèses

Dans le cadre de l'approche probabiliste la modélisation d'une structure est définie par :

- La définition d'un vecteur de variables aléatoires $\{X\}$, qui contient les variables représentant les données géométriques, les variables de chargement et les variables relatives aux propriétés mécaniques. Il est à noter qu'une analyse de sensibilité des variables d'études est nécessaire, lorsqu'on cherche à réduire le temps de calcul. C'est une façon d'estimer la contribution de chaque variable dans le modèle mécanique, afin d'en éliminer les moins influentes. Chaque variable sera alors, décrite par une distribution statistique.
- Un scénario décrivant la défaillance d'une fonction de performance $G = R - S$ qui compare la résistance au chargement.

Le vecteur considéré dans notre étude renferme les variables suivantes :

f_{frp} : Résistance du FRP (polymère renforcé de fibre).

t : Épaisseur du PRF.

L : Largeur de la bande.

D : Diamètre de l'éprouvette.

S : Pas de l'hélice

b. Principe

Dans une méthode fiabiliste, on associe à chaque mode de défaillance une fonction d'état limite $G(\{X\})$ qui définit le comportement de la structure. Elle est dite fonction d'état limite et s'écrit d'une façon générale comme suit :

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

(III. 5)

Avec :

$\{X\}$: vecteur aléatoire de la variable.

$R(\cdot)$: résistance de la structure vis-à-vis le mode de ruine considéré.

$S(\cdot)$: sollicitation agissante.

$G(\cdot)$: fonction d'état limite telle que :

$G(\{X\}) = 0$ Correspond à l'état limite.

$G(\{X\}) < 0$ Correspond au domaine de sécurité (fonctionnement normal).

$G(\{X\}) > 0$ Correspond au domaine de ruine (dysfonctionnement).

Dans notre cas la fonction résistante R est donnée par l'expression :

$$R = f_{cc} = f_{c0} + kf_1$$

(III. 6)

La fonction sollicitante S, est définie par le chargement extérieur appliqué :

$$S = f_{cs} = F/A$$

(III. 7)

c. Critère de défaillance et fonction d'état limite

Le scénario de défaillance défini dans cette analyse est lié à la rupture de l'éprouvette par fissuration due à l'effort normal de compression. Ce critère de défaillance est déterminé à partir de la fonction d'état limite comme suit :

$$G(\{X\}) = R - S = f_{cc} - f_{cs}$$

(III. 8)

De ce critère, découle le calcul de la probabilité de défaillance qui traduit la probabilité d'occurrence de ce scénario de défaillance. Elle est donnée par :

$$P_f = P(G(X) \leq 0)$$

(III. 9)

III. 3. Aperçu sur le fonctionnement du logiciel R

Le logiciel R est un logiciel de programmation libre qui fonctionne de deux façons possibles ; soit de façon interactive sur son plan principale, ou alors à l'aide d'un script indépendant.

III.3. 1. Origines

Le logiciel R est un logiciel de statistique créé par Ross Ihaka et Robert Gentleman. Il est à la fois un langage informatique et un environnement de travail : les commandes sont exécutées grâce à des instructions codées dans un langage relativement simple, les résultats sont affichés sous forme de texte et les graphiques sont visualisés directement dans une fenêtre qui leur est propre.

C'est une reproduction du logiciel S-plus qui est fondé sur le langage de programmation orienté objet S, développé par AT et T Bell Laboratoires en 1988. Ce logiciel sert entre autre à manipuler des données, à tracer des graphiques et à faire des analyses statistiques sur ces données.

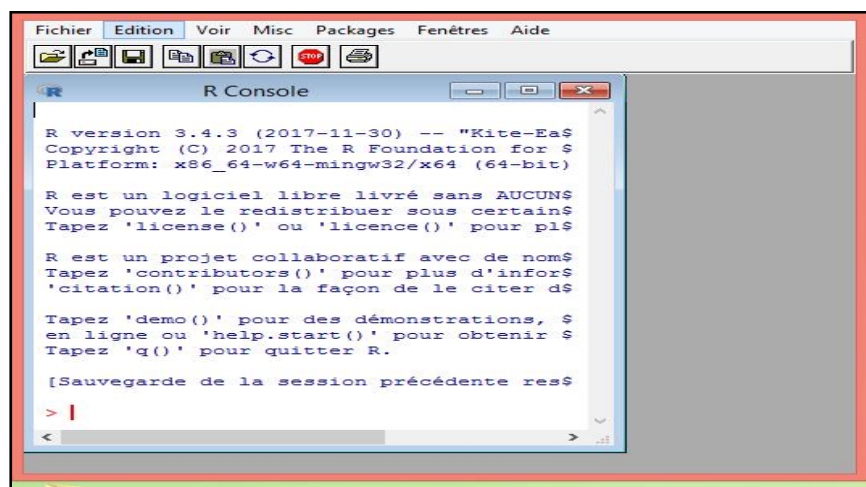


Figure III. 2. Interface principale de R GUI.

III.3. 2. Pourquoi utiliser R ?

Tout d'abord R est un logiciel gratuit et à code source ouvert (*open source*). Il fonctionne sous UNIX (et linux), Microsoft Windows et Mac OS. C'est donc un logiciel multi-plate-formes. Il est développé dans la mouvance des logiciels libres par une communauté, sans cesse, plus vaste de bénévoles motivés. Tout le monde peut d'ailleurs participer à son progrès en y intégrant de nouvelles fonctionnalités ou méthodes d'analyse non encore implémentées. Cela en fait, donc, un logiciel en rapide et constante évolution.

Le logiciel R est particulièrement performant pour la manipulation de données, le calcul et l'affichage de graphiques. Notons également qu'il est possible d'appeler des fonctions de Matlab directement depuis R au moyen du package *R.matlab* et des fonctions R, ensuite depuis Excel au moyen du package *RExcelInstaller*.

III.3. 3. Créer des objets dans R

On retiendra deux grands objets dans R.

III.3.3. 1. Les données

Elles peuvent se présenter sous forme de vecteurs, de matrices, de listes ou de tables de données. Elles peuvent être créées directement avec R ou être importées à partir de données au format Excel, statistica, CSV, etc. Le logiciel R différenciera les mots : Test, test, TEST et les considérera comme 3 objets différents. Il sera donc important de reprendre la bonne écriture d'un objet quand on posera des questions à R.

a. Données régulières

Une première solution pour créer une séquence de données régulières est la suivante :
 $a : b$, elle crée à partir de la valeur a et par pas de 1, une suite de nombre inférieurs ou égaux à b .

Si $ù*$, le pas diffère de 1, la commande à utiliser est `seq` dont la syntaxe est la suivante : $c(n-1, n-2, n-3)$, qui produit le vecteur contenant les valeurs n_1, n_2, n_3 .

D'autres fonctions sont également disponibles telles que:

Rep, qui permet de répéter un objet un certain nombre de fois.

Sequence, qui crée une suite de séquences de nombres entiers se terminant chacune par les valeurs spécifiées en argument.

gl (k,n), qui génère une série régulière dans un facteur comprenant k niveaux et n répétitions.

b. Données aléatoires

En statistique, on apprécie le fait de pouvoir générer des données aléatoires. Il s'avère que R est capable de le faire, et ce pour un grand nombre de densités de probabilité. Ces fonctions sont de la forme `rfunc (n, p1, p2,...)` où `rfunc` désigne la loi de probabilité, n le nombre de données à générer et p_1, p_2, \dots , les paramètres de la loi.

Voici un tableau qui fait apparaître la dénomination et les paramètres de certaines lois.

nom de la loi	fonction dans R
Gauss(normale)	<code>rnorm(n,mean=μ,sd=σ)</code>
exponentielle	<code>rexp(n, rate=λ)</code>
gamma	<code>rgamma(n, shape = a, scale = s)</code>
poisson	<code>rpois(n, λ)</code>
weibull	<code>rweibull(n, shape = a, scale = s)</code>
cauchy	<code>rcauchy(n, location = a, scale = s)</code>
student	<code>rt(n, df)</code>
fisher	<code>rf(n,df1,df2)</code>
binomiale	<code>rbinom(n,size,prob)</code>
géométrique	<code>rgeom(n,prob)</code>
uniforme	<code>runif(n, min=a, max=b)</code>

Figure III. 3.Dénomination des lois de probabilité dans R.

Afin d'obtenir la densité de probabilité, `dfunc` est utilisée à la place de `rfunc`. En ce qui concerne la densité de probabilité cumulée, ce sera `pfunc` et `qfunc` pour la valeur du quantile. Par contre, les arguments diffèrent selon la fonction utilisée, il est donc nécessaire de consulter l'aide associée.

III.3.3.2. Les fonctions

Elles permettent de modifier ou de décrire les données. Elles sont également utilisées pour réaliser des calculs et des tests statistiques ainsi que des graphiques.

Une fonction dans R, s'écrit généralement en minuscules et est suivie de parenthèses dans lesquelles sont insérés, si besoin, des paramètres en rapport avec la fonction utilisée.

Les paramètres inscrits entre les parenthèses seront séparés par des virgules. Donc pour les nombres décimaux, il faudra utiliser l'écriture anglo-saxonne, c'est-à-dire le point à la place de la virgule.

III.3. 4. R et les statistiques

R est un logiciel dans lequel de nombreuses techniques statistiques modernes et classiques ont été adaptées. Les méthodes les plus courantes permettant de réaliser une analyse statistique sont :

- Statistiques descriptives ;
- Tests d'hypothèse ;

- Analyse de la variance ;
- Méthode de régression linéaire (simple et multiple) ;
- Méthode d'analyses multi variées.
- Classification hiérarchique, etc.

III.3. 5. R et les graphiques

Une des grandes forces de R, c'est la possibilité de réaliser des graphiques de qualité. R permet, une représentation très précise dont les règles sont assez intuitives. Les commandes de quelques graphes sont présentées ci-dessous.

plot(x)	graphe des valeurs de x (sur l'axe des y) ordonnées sur l'axe x
plot(x,y)	graphe de y en fonction de x
boxplot(x)	boîte à moustaches
hist(x)	histogramme des fréquences de x
barplot(x)	histogramme des valeurs de x
qqnorm(x)	quantiles de x en fonction des valeurs attendues selon une loi normale
qqplot(x,y)	quantiles de y en fonction de ceux de x

Figure III. 4.Dénomination des graphiques dans R.

Pour toutes ces fonctions, il existe un nombre impressionnant d'options qu'il est bon de consulter. Par ailleurs, des commandes comme legend, title, text permettent de commenter des graphiques, ce qui est essentiel à la compréhension d'un graphe.

III. 4.Application de la méthode FORM

Cette méthode est basée sur la détermination de l'indice de fiabilité β qui permet ensuite d'accéder à une valeur approchée de la probabilité de défaillance. Plusieurs définitions sont possibles pour β , mais celle préconisée par Hasofer et Lind est aujourd'hui la plus largement employée compte tenu de son invariance vis-à-vis de la représentation de la fonction de performance.

La méthode FORM est une méthode numérique d'approximation qui nécessite une hypothèse très forte concernant la normalité des lois des variables de conception, ce qui n'est pas toujours vérifié en pratique. Vu l'importance de cette méthode, plusieurs études sont menées pour étudier en détails les différentes étapes de cette méthode, sa limite d'application et la validité des résultats obtenus selon les données disponibles afin de bien l'améliorer selon les besoins industriels.

III.4. 1. Test de normalité

Afin d'évaluer la probabilité de défaillance par la méthode FORM, il est important de vérifier la normalité des deux fonctions aléatoires considérées à savoir : la fonction des résistances (**R**) et la fonction des sollicitations (**S**) afin de pouvoir utiliser l'expression suivante qui donne la probabilité de défaillance par la méthode FORM.

$$P_f = P[f_{cr} - f_{cs} < 0] = P[G < 0] = \Phi \left[\frac{\mu_{fcs} - \mu_{fcr}}{\sqrt{\sigma_{fcr}^2 + \sigma_{fcs}^2}} \right]$$

(III. 10)

Cela a été évalué par le test de normalité Kolmogorov-Smirnov.

Il s'agit de comparer la distribution de la marge de sécurité à une distribution normale. Le Ks test indique le niveau de normalité de la distribution, cette distribution est normale lorsque la P-value est supérieure au risque d'erreur $\alpha=5\%$.

Les P-values associées indiquées dans le (Tableau III.1) sont plus élevées que les niveaux de signification habituellement utilisés pour tester la normalité (le niveau de signification est de 5%), c'est-à-dire, que la méthode FORM peut être applicable pour estimer la probabilité de défaillance, en calculant l'indice de fiabilité.

Tableau III. 1: Résultats du test de normalité.

Force (kN)	p-value (fcs)	p-value (fcr)
50	0.8243	0.09433
100	0.6642	0.9877
200	0.3983	0.6082
300	0.5811	0.7007
400	0.4719	0.5457
500	0.7369	0.6848
600	0.4922	0.5214
700	0.3255	0.4443
800	0.511	0.8807
900	0.372	0.8439
1000	0.1854	0.8157

III. 5. Identification des variables

Pour notre étude fiabiliste l'enjeu est d'indiquer les paramètres incertains intervenant dans l'analyse de la fissuration, appelés « variables aléatoires » et de mesurer leur impact dans la fiabilité du système étudié. Une étude de sensibilité a été menée à cet effet.

III.5. 1. Variables aléatoires

Un matériau ou une structure mécanique sont considérés comme des systèmes comportant une entrée, un état et une sortie.

a. Variables aléatoires de base

Les variables aléatoires de base sont des grandeurs physiques d'entrée directement accessibles telle que les dimensions géométriques d'une construction, les caractéristiques mécaniques et physico-chimiques des matériaux constitutifs ainsi que les charges appliquées.

b. Variables aléatoires de sortie

Les variables aléatoires de sortie sont des grandeurs qui sont fonction des variables aléatoires d'entrée, qui rendent compte de l'état de la structure. Elles sont liées dans une condition de fiabilité représentant le scénario de défaillance.

III.5. 2. Analyse de sensibilité

Cet aspect, propre aux études fiabilistes, permettra de calculer l'influence de chaque variable aléatoire sur la probabilité de défaillance.

L'objectif d'une analyse de sensibilité est de quantifier l'impact de chaque facteur sur les variables de sortie. Ceci permet de tenir compte dans les calculs, uniquement des variables qui ont un effet significatif, ce qui conduira à la réduction des temps d'analyse qui peuvent être très longs.

- Sensibilité de l'indice de fiabilité β

L'étude de l'importance des variables nous donne une idée claire et précise sur le comportement mécano-fiabiliste du système étudié. Pour sélectionner les variables les plus significatives, pour mieux maîtriser leur rôle par rapport au comportement mécanique ou fiabiliste, une analyse de sensibilité semble nécessaire

Il s'agit donc de déterminer le facteur d'omission γ_i permettant de fournir la sensibilité statistique, en évaluant l'influence d'une variable sur la fiabilité, en la fixant à une valeur déterministe.

$$\gamma_i = \frac{\beta_{x_i=x_i}}{\beta}$$

(III. 11)

$\beta_{x_i=x_i}$ Correspond au calcul de l'indice de fiabilité où toutes les variables sont aléatoires, sauf X_i qui est déterministe pour une valeur X_i .

La variable « β » est l'indice de fiabilité lorsque toutes les variables sont probabilistes.

Une valeur proche de l'unité du pourcentage de variation de ce coefficient, indique que la variable évaluée est sans effet sur la probabilité de défaillance. Etant donné que les études fiabilistes peuvent conduire à des calculs longs, cette vérification envisage la possibilité de ne pas probabiliser l'ensemble des variables et garantir ainsi une simplification des calculs.

Si la valeur du facteur d'omission est supérieure à l'unité, cela met en évidence un niveau de sécurité surestimé. En revanche, un résultat inférieur à l'unité, indique un niveau de sécurité sous estimé. Pour ces deux situations, la variable doit être considérée comme stochastique. Les résultats du facteur d'omission sont représentés dans le tableau qui suit :

Dans le cadre de l'étude de la fiabilité des cylindres confinés hélicoïdalement avec des PRFJ, nous avons considéré que les variables suivent des lois distribution normale, définies par les moyennes expérimentales avec des coefficients de variation de 10% pour chaque variable. Un groupe de 100 valeurs est alors généré pour chaque variable, selon sa fonction de distribution.

L'étude de sensibilité conduite sur l'ensemble des variables, les résultats du calcul du coefficient d'omission sont résumés dans le tableau.

Tableau III.2. Résultats du test de sensibilité.

Variables	β	p-value (fcs)	p-value (fer)	$\beta_{x=xi}$	γ_i (gamma)	%var de γ_i	Niveau de sécurité
Diamètre de l'éprouvette D	0.2523	0.7369	0.6848	0.226	0.895	11.730	Surestimé
Force du chargement extérieur F				0.154	0.609	64.204	
Epaisseur du composite t				0.265	1.049	4.690	
Longueur de la bande L				0.343	1.359	26.410	
Pas de l'hélice S				0.219	0.867	15.373	
Résistance du FRP ffrp				0.3005	1.191	16.033	

Les caractéristiques des variables aléatoires, ainsi que la décision relative à leur sensibilité, sont données dans le tableau.

Tableau III.3. Variables aléatoires à retenir pour le calcul fiabiliste.

Variables	unité	Sensibilité	Moyenne μ	Ecart-type σ	Coefficient de variation
Diamètre de l'éprouvette D	mm	Observée	150	15	10%
Force de chargement	KN	Observée	500	50	

extérieur F				
Epaisseur de composite t	mm	Observée	2	0.2
Longueur de la bande L	mm	Observée	30	3
Pas de l'hélice S	mm	Observée	75	7.5
Résistance du FRP ffrp	N	Observée	70	7

III.5. 3. Distributions des variables aléatoires

Il ressort du calcul précédent, que toutes les variables considérées dans cette étude, ont une influence sur la probabilité de défaillance des cylindres confinés.

Elles seront alors, considérées dans le calcul, comme étant des variables probabilisées. Les lois de distribution des différentes variables aléatoires sont représentées par les figures (III.5 à III.10).

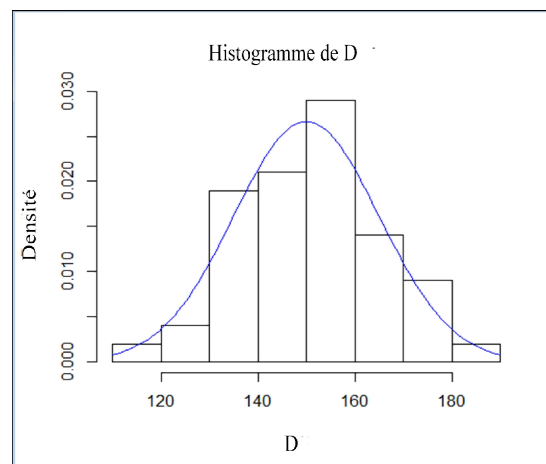


Figure III. 5. Distribution normale de la variable D.

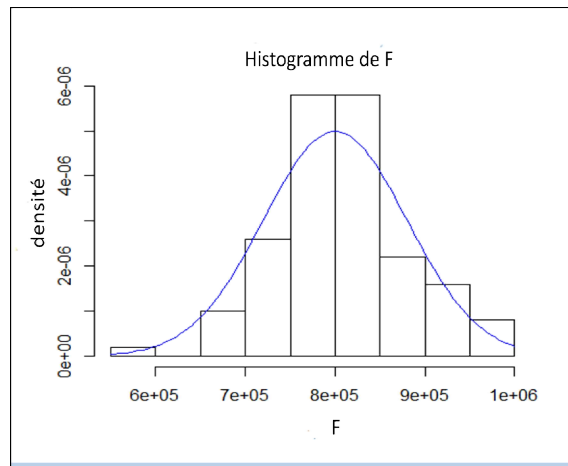


Figure III. 6. Distribution normale de la variable F.

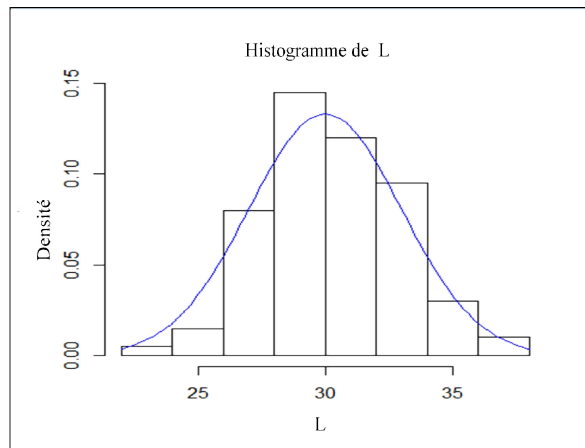


Figure III. 7. Distribution normale de la variable L.

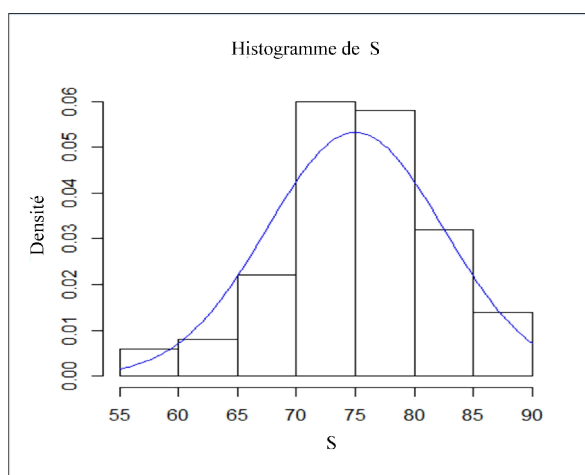


Figure III. 8. Distribution de la variable S.

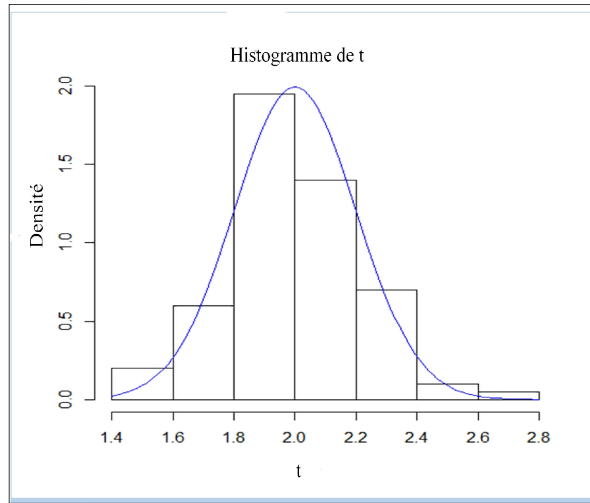


Figure III. 9. Distribution normale de la variable t.

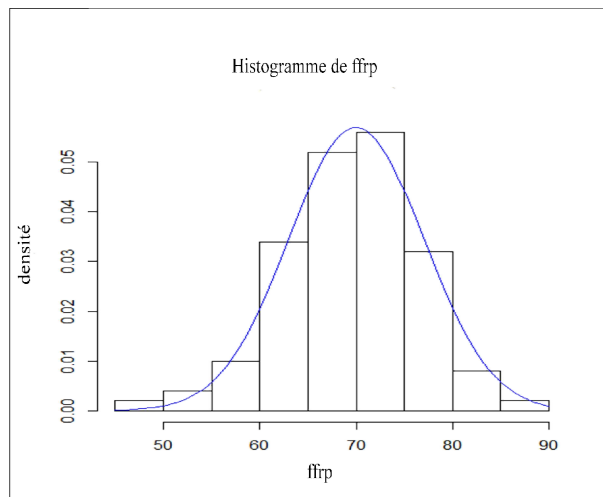
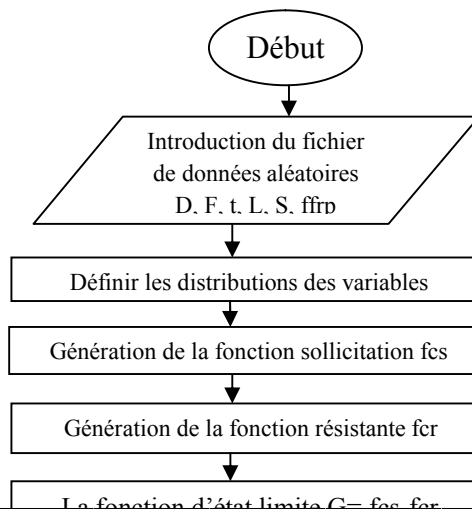


Figure III. 10. Distribution de la variable ffrp.

III. 6. Algorithme de l'analyse de la fiabilité

Les différentes étapes de l'analyse de la fiabilité de notre système mécanique, par la méthode FORM, peuvent être résumées par l'organigramme suivant :



Effectuer un test de normalité Kolmogorov

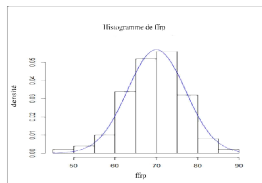


Figure III. 11. Organigramme de l'analyse fiabiliste des cylindres confinés.

III. 7. Optimisation mathématique, à l'aide des algorithmes génétiques (AG)

Une optimisation mathématique sous AG, est conduite dans le cadre de cette étude. Elle a pour but, de trouver la combinaison de variables la plus défavorable, qui donnent ensuite une probabilité de défaillance cible égale à l'unité.

Résoudre un problème d'optimisation, c'est rechercher, parmi un ensemble de solutions qui vérifient des contraintes données, les solutions qui rendent minimale (ou maximale) une fonction mesurant la qualité de cette solution. Cette fonction est appelée fonction objectif ou fonction évaluation. [28]

Les algorithmes génétiques sont utilisés comme une technique d'optimisation efficace pour la recherche de l'optimum global d'une fonction. Les AGs ont été mis au point par J. Holland et décrits plus en détail par D.E.Goldberg. Leur mise en œuvre consiste à créer une population initiale puis, par un processus itératif de sélection, faire évoluer cette population en fonction d'un critère d'adaptation. Cette adaptation représente la qualité de la solution potentielle. Le passage d'une population à l'autre est appelé une génération. La stratégie étant globalement élitiste, seuls les individus ayant la meilleure adaptation (meilleure solution) seront conservés de génération en génération. Les étapes de calcul d'un AG, sont résumées dans la (figure III.11).

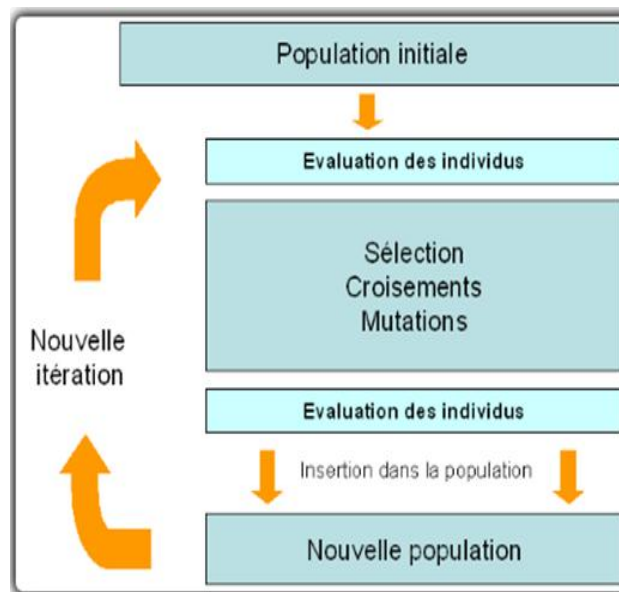


Figure III. 12.Etapes d'exécution d'un algorithme génétique

Le programme permettant de calculer la variante qui donne une probabilité de défaillance $P_f=1$, est exécuté en utilisant un package spécial (GA) qu'on peut introduire dans le logiciel R.

III. 8. Conclusion

L'approche développée dans ce chapitre, nous a permis d'obtenir la valeur de la probabilité de défaillance, en fonction de l'effort appliqué pour des cylindres confinés hélicoïdalement avec un PRFJ, en se basant sur l'analyse déterministe découlant d'une étude expérimentale, réalisée sur ces cylindres.

Un scénario de défaillance a été déterminé vis-à-vis l'effort de compression et l'analyse fiabiliste à été conduite en utilisant la méthode FORM.

Après les avoir définies, les lois de distribution des différentes variables ont été soumises à une analyse de sensibilité, qui a mis en évidence l'influence de toutes les variables sur la probabilité de défaillance de notre système mécanique. Elles ont été de ce fait, considérées comme aléatoires dans le calcul.

L'analyse de fiabilité, en tenant compte de toutes ces données, a été réalisée. Les résultats obtenus sont détaillés et discutés dans le chapitre suivant.

IV. 1 Introduction

La conception des ouvrages en béton armé, consiste à déterminer les dimensions et les caractéristiques de leurs éléments pour qu'ils accomplissent certaines fonctions avec un degré de sécurité visé et qu'ils se comportent d'une manière satisfaisante lors de leur utilisation. Pour cela, une relation doit être établie entre l'action que subit la structure (le chargement : S) et sa réponse (la résistance : R).

Une approche probabiliste s'appuyant sur les outils de la fiabilité mécanique a été utilisée dans le but d'évaluer l'influence de la variabilité des paramètres employés.

La probabilité de défaillance P_f estimée par la méthode FORM basée sur la détermination de l'indice de fiabilité β , d'éprouvettes en béton soumise à un effort normal de compression, a été déterminée. Les résultats de cette analyse seront détaillés dans ce qui suit.

IV. 2. Résultats de l'analyse de fiabilité

L'analyse fiabiliste nous a permis de déterminer la probabilité de défaillance ainsi que l'indice de fiabilité, pour différentes valeurs de chargement.

IV.2. 1. Évolution de l'indice de fiabilité en fonction du chargement

Les courbes ci-dessous présentent les résultats de l'analyse de fiabilité (indice de fiabilité β , probabilités de défaillance P_f) menée sur des cylindres en béton-composite PRFJ, pour différents coefficients de variation.

Les résultats obtenus, ont permis de tracer l'évolution de l'indice de fiabilité en fonction, de la charge appliquée pour un coefficient de variation de 10%.

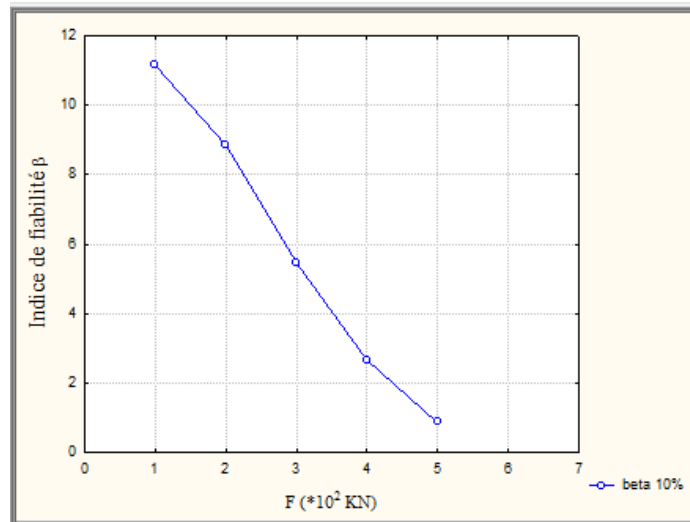


Figure IV. 1 Evolution de β en fonction du chargement F.

La figure montre la variation de l'indice de fiabilité β , pour le coefficient de variation de 10%, en fonction du chargement extérieur. On peut facilement constater que la fiabilité de la structure diminue lorsqu'augmente le chargement.

IV.2. 2 Évolution de la probabilité de défaillance Pf en fonction du chargement

La figure IV.2, montre l'évolution de la probabilité de défaillance en fonction de la charge appliquée aux éprouvettes confinées pour un coefficient de variation de 10%.

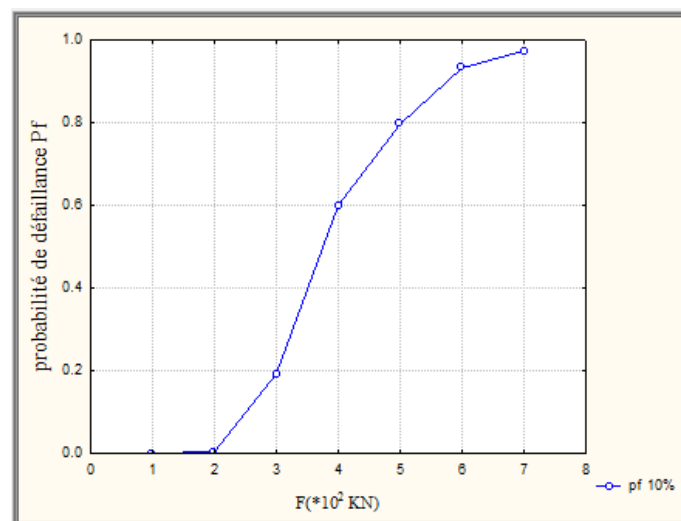


Figure IV. 2 Évolution de Pf en fonction du chargement F.

La figure montre la variation de la probabilité de défaillance, pour le coefficient de variation de 10%, en fonction du chargement extérieur. Il ressort de ce graphe que la probabilité de défaillance de la structure augmente avec l'augmentation du chargement.

IV. 3 Prise en compte de l'effet de la variabilité des paramètres sur la fiabilité

Le coefficient de variation étant pris arbitrairement, dans notre étude, égal à 10%, il nous a semblé intéressant de considérer d'autres valeurs de ce coefficient de variation afin de mettre en évidence l'effet de la variabilité sur la fiabilité des cylindres confinés. A cet effet, des coefficients de variation de 5%, 15% et 20% ont été considérés.

Les résultats obtenus ont permis de tracer l'évolution de l'indice de fiabilité ainsi que la probabilité de défaillance, pour les différentes valeurs des coefficients de variation considérés. Les figures IV.3, IV.4 et IV.5, représentent l'évolution de l'indice de fiabilité en fonction de la charge appliquée, pour les valeurs du coefficient de variation de 5%, 15% et 20% respectivement.

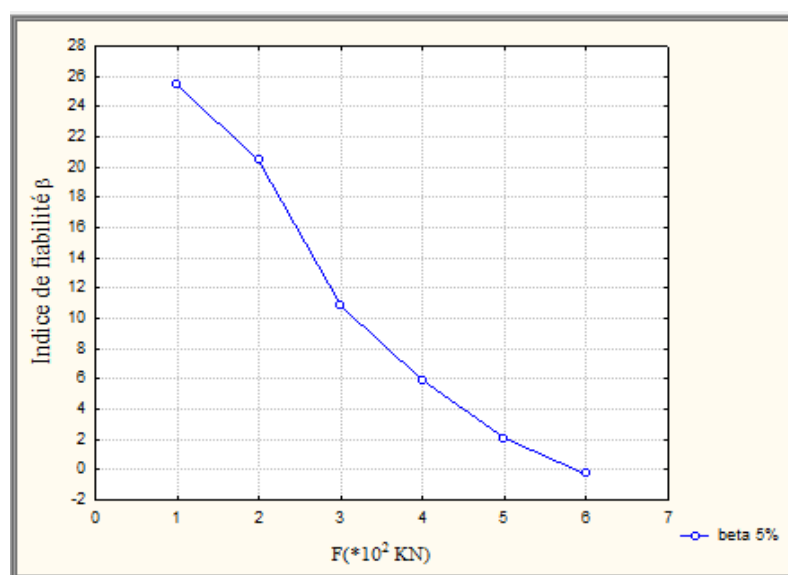


Figure IV. 3 Évolution de β en fonction du chargement F.

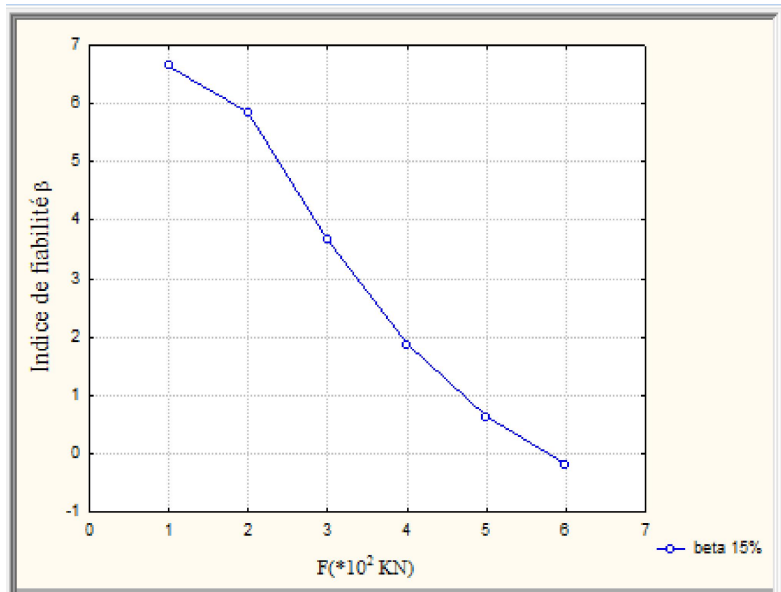


Figure IV. 4 Évolution de β en fonction du chargement F.

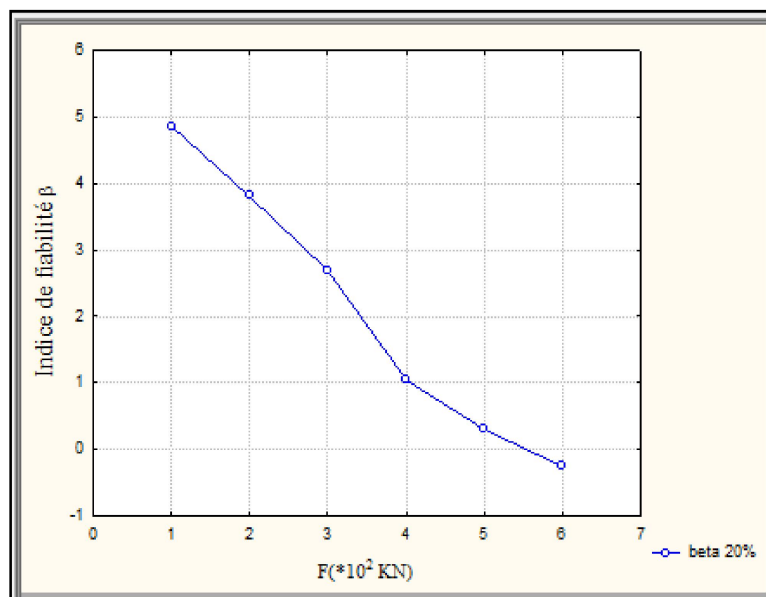


Figure IV. 5 Évolution de β en fonction du chargement F.

Il ressort de l'analyse des graphes des figures IV.3, IV.4 et IV.5, que quelque soit le coefficient de variation, l'indice β , qui reflète le risque d'amorçage des fissures de compression, diminue de façon significative en fonction du chargement extérieur appliqué. Ceci est traduit par la propagation des fissures dans les éléments, jusqu'à l'état limite défini par le modèle fiabiliste.

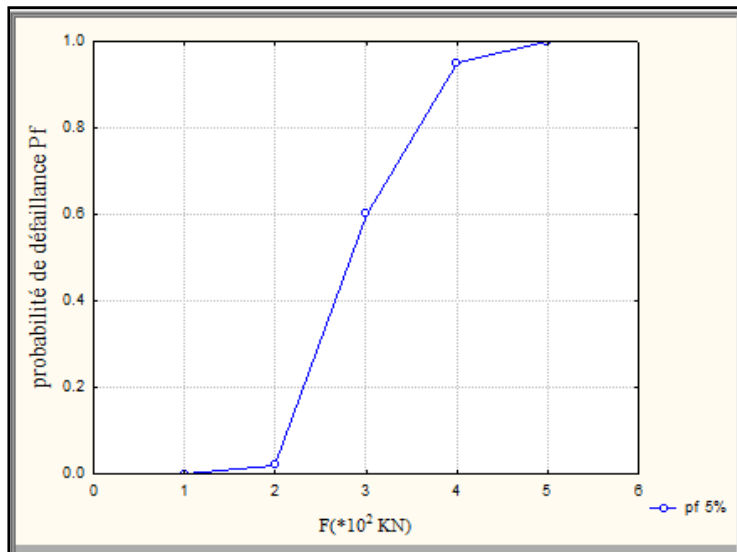


Figure IV. 6 Évolution de Pf en fonction du chargement F, pour CV =5%.

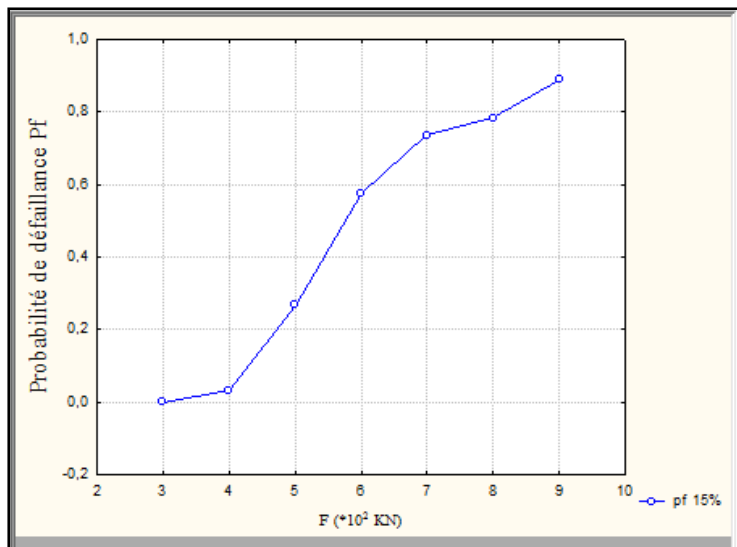


Figure IV. 7 Évolution de Pf en fonction du chargement F, pour CV =15%.

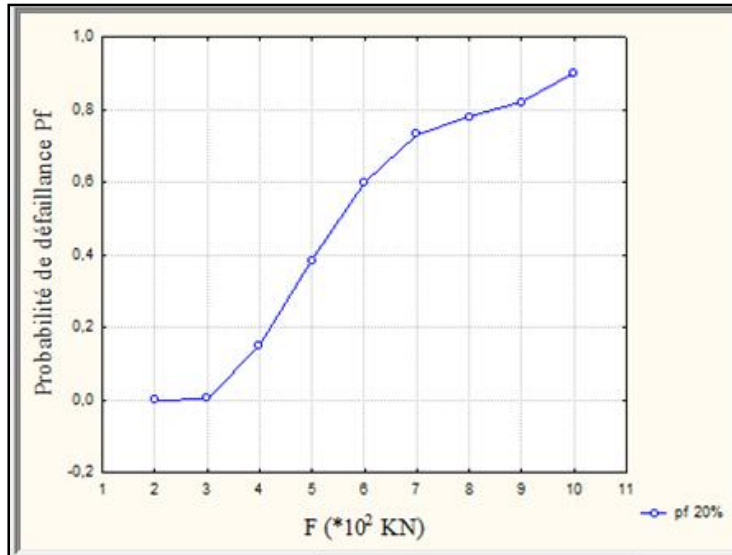


Figure IV. 8 Évolution de Pf en fonction du chargement F, pour CV =20%.

La probabilité de défaillance des cylindres confinés hélicoïdalement avec le PFRJ, contrairement à l'indice de fiabilité, augmente avec l'augmentation de la charge de compression qui leur est appliquée.

Par ailleurs, des graphiques regroupant les résultats en termes d'indice de fiabilité et de probabilité de défaillance pour toutes les valeurs des coefficients de variation considérés dans cette étude, sont présentés dans ce qui suit.

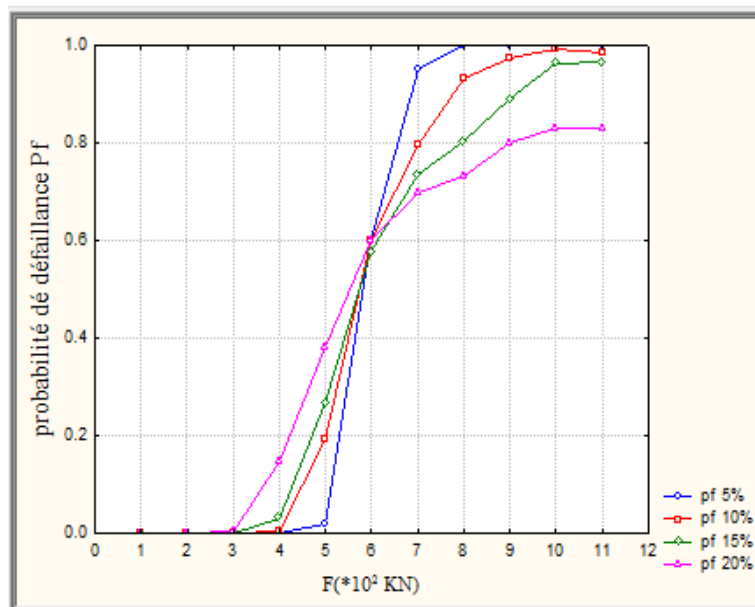


Figure IV. 9 Effet de la variabilité du coefficient de variation sur la probabilité de défaillance Pf.

La (Figure IV.9) montre clairement que le point d'inflexion correspond à la situation où les moyennes de f_{cr} sont égales aux moyennes de f_{cs} . Ce point sépare le domaine de sûreté (partie inférieure à ce point) du domaine de défaillance (partie supérieure à ce point). La position de ce point, qui correspond à une probabilité de défaillance ayant une valeur de 0.595 pour un effort de 500 KN, montre une parfaite concordance avec les résultats expérimentaux.

Il ressort du graphe, que la variabilité a un effet sur la fiabilité des cylindres confinés. En effet, probabilité de défaillance est proportionnelle au coefficient de variation. Pour montrer clairement cette relation, une représentation logarithmique des probabilités de défaillance pour les différents coefficients de variation, permet d'observer plus nettement la zone des faibles valeurs de la force.

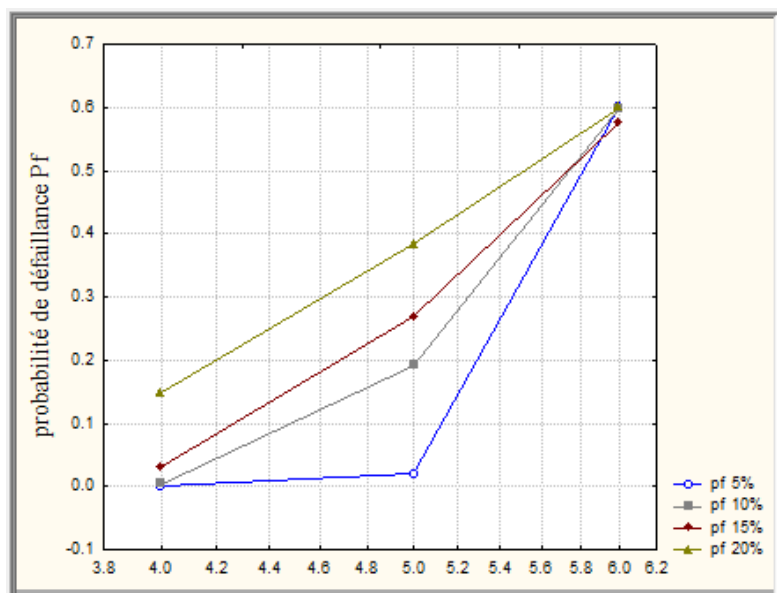


Figure IV. 10 Probabilité de défaillance (échelle logarithmique) en fonction de la force F .

De la même façon, la variabilité influence l'indice de fiabilité. Ils sont en effet, inversement proportionnels, puisque l'augmentation du coefficient de variation induit la diminution de l'indice de fiabilité.

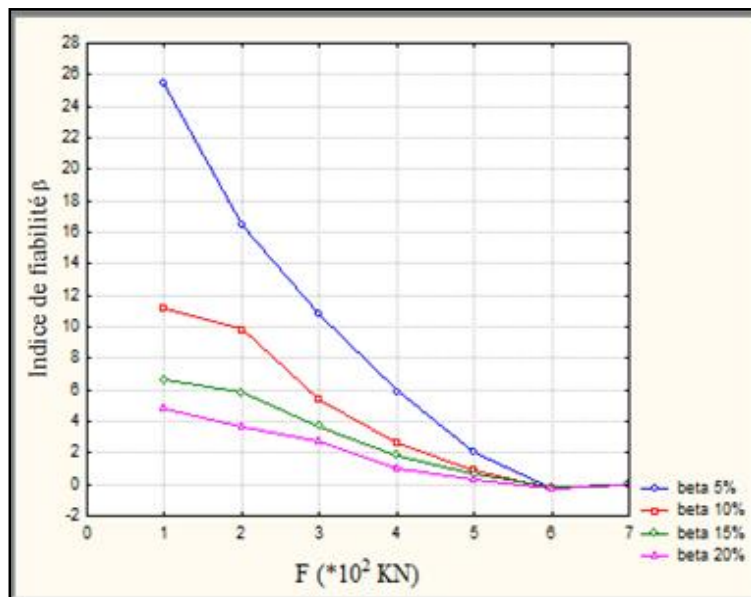


Figure IV. 11 Effet de la variabilité du coefficient de variation sur l'indice de fiabilité β .

Cette approche a pour but de définir les valeurs des variables qui conduisent à une situation de ruine des cylindres confinés. Elle s'inscrit dans l'optique de l'aide à la décision. Il nous a semblé pertinent, en effet, de proposer une optimisation, par les algorithmes génétiques, des variables aléatoires qui gouvernent la résistance à la compression des cylindres confinés.

IV. 4. Optimisation de la probabilité de défaillance des cylindres confinés, par les algorithmes génétiques.

Après avoir présenté les différentes étapes de l'exécution d'un algorithme génétique, nous allons l'appliquer pour notre système mécanique.

Afin de trouver la combinaison de variables la plus défavorable, qui donnera une probabilité de défaillance cible, $P_f=1$, nous avons mené une optimisation à l'aide d'un algorithme génétique (AG) sous le logiciel R et nous avons abouti aux résultats suivants.

```

+-----+
|           Genetic Algorithm           |
+-----+

GA settings:
Type                = real-valued
Population size     = 1
Number of generations = 100
Elitism             = 1
Crossover probability = 0.8
Mutation probability = 0.1
Search domain =
      D           F           t           L           S           ffrp
Min 122.2655  693190.9  1.377552  19.69594  47.68267  47.03696
Max 207.5114  1414097.0  2.658691  41.85826  96.87909  92.17363

GA results:
Iterations          = 100

Solution =
      D           F           t           L           S           ffrp
[1,] 153.3169  755041.7  2.025942  35.04844  68.37873  82.50905
>

```

Figure IV. 12 Résultats de l'optimisation.

Les valeurs des variables qui permettent donc de fixer une valeur cible pour la probabilité de défaillance, $P_f=1$, sont représentées ci-dessous.

Tableau IV. 1. Représente les résultats de l'optimisation.

paramètres	valeurs
D	153.3169
F	755041.7
T	2.025942
L	35.04844
S	68.37873
ffrp	82.50905

IV. 5. Conclusion

A travers ce chapitre nous avons décrit l'objectif principal de l'analyse de fiabilité, qui consiste à valider la technique de confinement avec des polymères renforcés de fibre de jute appliquée sur des éprouvettes en béton, soumises à un effort de compression axiale.

L'indice de fiabilité qui reflète l'état de sureté de l'élément est estimé par la méthode d'approximation du premier ordre FORM. Le traitement des différents résultats de l'analyse fiabiliste permet de valider les résultats obtenus dans l'analyse expérimentale, et laisse apercevoir tout l'intérêt de l'utilisation des matériaux composites pour améliorer les performances mécaniques, notamment la capacité portante des cylindres en béton- composites sous chargement de compression.

Des abaques qui mettent en relation la probabilité de défaillance, la charge appliquée, ainsi que le coefficient de variation ont été établis.

Une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et numériques est observée lors de la confrontation de l'indice de fiabilité. Enfin, un outil d'aide à la décision a été recommandé à l'aide d'une optimisation sous forme d'algorithmes génétiques (AG) qui permet d'évaluer les paramètres conceptuels de notre système mécanique qui conduiraient à la ruine de la structure.

L'objectif de ce travail de recherche étant de montrer l'influence des paramètres de confinement sur la fiabilité de cylindres en béton confinés avec des bandes hélicoïdal de PRFJ. A cet effet, ces paramètres ont été considérés comme des variables aléatoires suivant chacun, une loi normale.

Cette approche part du principe de prise en compte de la variabilité du comportement des structures composites, les incertitudes de la phase de conception et les variabilités de leurs paramètres conceptuels, pour considérer les défaillances structurelles des éprouvettes.

L'objectif de cette démarche fiabiliste est de donner la probabilité de défaillance ainsi que l'indice de fiabilité pour différentes valeurs de la charge de compression. Le calcul de la fiabilité a été mené par la méthode de fiabilité du premier ordre (FORM). La variabilité des propriétés mécanique et géométriques est introduite dans le modèle stochastique. Les probabilités de défaillances et les indices de fiabilités consécutifs sont ensuite comparés aux résultats expérimentaux.

Le traitement des différents résultats obtenus en termes d'évolution de l'indice de fiabilité, qui reflète l'état de sureté de l'élément et en termes de probabilité de défaillance due à l'amorce et la propagation des fissures de compression, laisse entrevoir tout l'intérêt de l'utilisation des matériaux composites, pour améliorer les performances mécaniques, notamment la capacité portante des cylindres composites.

Au terme de cette étude, nous avons montré que la démarche fiabiliste permet d'évaluer la probabilité de défaillance d'une structure ainsi que de mesurer la sensibilité de cette probabilité par rapport à chacune des variables aléatoires introduites. L'analyse de sensibilité effectuée nous a permis de localiser les paramètres les plus influents sur la stabilité de la L'éléments. Il a été montré que la probabilité de défaillance augmentait avec l'augmentation du chargement appliqué. Ainsi, l'indice de fiabilité décroît avec l'augmentation de ce dernier. Le point d'inflexion des courbes de la Pf, correspond à une probabilité $P_f=0.595$, pour une charge de 500 KN, ce qui est un parfait accord avec les résultats expérimentaux. Par ailleurs, l'analyse fiabiliste a montré que le CV des variables aléatoires influençait la fiabilité des cylindres confinés, puisque celle-ci diminue, plus que le CV augmente.

Ajouter a cela, cette démarche constitue un outil d'aide à la décision à travers le programme d'optimisation basé sur les algorithmes génétique (AG). En effet, la combinaison des variables conduisant a la ruine totale des structures a été établie.

La détermination de la probabilité de défaillance pour certains systèmes structurels mécaniques est très importante même si, aujourd'hui, la conception déterministe règne sur la conception probabiliste dans le domaine du génie civil. Les analyses probabilistes appliquées dans le génie civil demandent à être approfondies, car la vérification des résistances porte de nombreuses incertitudes.

A partir des résultats obtenus par l'approche probabiliste, des abaques ont été conçus pour mettre en rapport les paramètres probabilité de défaillance, charge appliquée et coefficient de variation. Par exemple, pour un scénario de défaillance défini parla force résistante, la Pf de 59.9% est déduite pour une charge ultime de 500KN et un CV de 10% pour toutes les variables aléatoires considérés.

Au terme de ce travail, nous nous sommes aperçu, que malgré que les méthodes fiabilistes soient largement utilisées dans le monde, elles restent, cependant, peu connues dans notre pays. Il nous vient alors à l'esprit, la nécessité de créer un groupe de réflexion, qui aura pour mission

- De faire connaitre les méthodes fiabiliste ainsi que leurs applications.
- Réaliser des applications en collaboration avec les différents départements concernés.
- Proposer un cours de fiabilité des structures pour les ingénieurs des départements de génie mécanique, génie civil et génie aéronautique, pour permettre aux étudiants de découvrir ce domaine.
- Collaborer avec les spécialistes de ce domaine.β

En guise de perspective à de futurs travaux de recherche, nous pouvons suggérer ce qui suit

- Reconduire le même calcul avec une autre méthode telle que la méthode de Monte Carlo pour conforter les résultats obtenus par FORM.

- Calculer la fiabilité de cylindres confinés de la même façon avec une PRF à base d'une fibre différente ; puisque le travail expérimentale a été fait sur le confinement avec un PRFV.
- Considérer les CV expérimentaux, pour les variables testées expérimentalement.

Henri Poincaré, a écrit en 1903 dans la publication «Science et méthode» où il a incité à accepter et à vivre avec l'incertitude comme réalité. «Si nous connaissons exactement les lois de la nature et la situation de ce même univers à l'instant initial, nous pourrions prédire exactement la situation de ce même univers à un instant ultérieur. Mais, lors que même les lois naturelles n'auraient plus de secret pour nous, nous ne pourrions connaître la situation initiale qu'approximativement».

[1] **Cheick Ahmed Hyacinthe.** Comportement en fatigue des composites monolithiques et sandwichs: Détection et suivi de l'endommagement par techniques non destructives. Thèse de doctorat. Sawadogo, Lille 1. 2009. 189 p. Format PDF.

[2] **Faten BOURBITA.** «Comportement en fatigue an isotherme des composites unidirectionnels à matrice titane renforcée par des fibres de carbure de silicium ». Thèse de doctorat, l'École nationale supérieure des mines de Paris, Spécialité (Sciences et Génie des Matériaux) 2011. 183 p

[3] **Lemaire, M., Châteauneuf, A., &Mitteau, J. C.,** « Fiabilité des structures couplage mécano-fiabiliste » édition Lavoisier, (2005).France. p 21, ISBN : 2-7462-1057-6.

[4] **Aouas Y.,** Optimisation fiabiliste de la conception et de la maintenance des structures, Thèse de doctorat, à l'Ecole polytechnique d'Alger, 2008.

[5] **Lemaire, M., Châteauneuf, A., &Mitteau, J. C.** « Fiabilité des structures couplage mécano-fiabiliste » édition Lavoisier, (2005).France. p 24.25.26, ISBN : 2-7462-1057-6.

[6] **SELAM Yousef, HADDAD Lounis.** « Analyse d'un réservoir surélevé soumis à l'action du vent » mémoire de master CHA (construction hydraulique et aménagement). Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2017. 95 p.

[7] **J. A Calgaro.** « Fiabilité des ouvrages de Génie Civil ». Mission de la recherche et de la Réglementation. 46 Avenue Aristide Briand-92225 Bagneux, 1976 SETRA

[8] **JEAN-PIERRE, Thérèse Phan Rowencyk.** « Manuels d'exercice et problèmes de statistique et probabilité ». Paris 2012. 2ème Edition DUNOD.

[9] **SI SALEM Abdelmadjid.** « Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation ». Thèse de Doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2016, 151 p.

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

[11] **H. Dehmous.** «Fiabilité et micromécanique des matériaux composites Application à la passerelle de Laroin ». Thèse de Doctorat, de l'Institut National Polytechnique de Toulouse ; 2007.

[12] **Dang, C.-T.** « Méthodes de construction des courbes de fragilité sismique par simulations numériques ». Thèse doctorat, Université BLAISE PASCAL-Clermont II.

[13] **Mendenhall, W., Beaver, R. J., & Beaver, B. M.** «Introduction to Probability and Statistics» (Brooks/Cole, Cengage Learning Ed.). USA.

[14] **ASSIF Safa.** « Fiabilité et optimisation des structures mécaniques à paramètres incertains : application au cartes électroniques ». Thèse de doctora. Université mohammed 5- agdal, rabat. Octobre 2013.

[15] **Arnold Ballière et al.** « Théorie de la fiabilité, application à l'évaluation structurale des ouvrages d'art » Rapport d'étude, 2012.

[16] [Ehsan Jahani](#), [Mohsen A. Shayanfar](#), [Mohammad A. Barkhordari](#)
«Structural Reliability Based on Genetic Algorithm-Monte Carlo (GAMC) » Article
Published November 7, 2016.

[17] **BENYAHY Karim.** « Couplage mécano-fiabiliste appliqué au calcul non linéaire des structures » thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2013. 174 p.

[18]. **Reuven Y. Rubinstein.** « Simulation and the Monte Carlo Method», Edition John Wiley & Sons, Inc. May 2008, ISBN: 9780471089179.

[19] **O.D. Ditlevsen ET H.O. Madsen.** « Structural Reliability Methods». Edition John Wiley & Sons Inc, 1996.

[20] **BERRADIA Mohammed.** «Analyse de l'effet du confinement transversal sur les éléments structuraux avec matériaux composites ». Thèse de doctorat, université de génie civil et d'architecture hassiba Benbouali de Chlef. 2017, 198 p.

[21] **R. BENZAID H.A. MESBAH N. CHIKH.** « Contribution à l'Étude des Matériaux Composites Dans le Renforcement et la Réparation Des Éléments

Structuraux Linéaires en Béton ». Hal-00782103, version 1 - 30 Jan 2013 978-613-1-55146-8.

[22] **Raphaël Contamine.** « Contribution à l'étude du comportement mécanique de composites textile-mortier : application à la réparation et/ou renforcement de poutres en béton armé vis-à-vis de l'effort tranchant ». Thèse de doctorat, matériaux et structure de l'université de Lyon. Hal-00715159 314 p.

[23] **Laclau et al.** « Technique innovante pour le renforcement des fondations de pylônes électriques ». Article, Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG '08 – Nantes 2008.

[24] **SAIDANI Kamal, RACELMA Ghania, ABDI Said.** « Etude probabiliste d'un composite à base de matériaux recyclés ». Article d'études, 2016, Constantine, Alegria. ICEMAEP2016

[25] **ABDELKADER Iddir.** « Modélisation des éléments de structure de section circulaire en béton armé confiné (Analyse de la fissuration) ». Thèse de doctorat, 2016.

[26] **J.M. Berthelot** « Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures » Edition. Lavoisier, (2005), ISBN: 2-7430-0771-0.

[27] **OULD EL HACEN Zein El Abidine** « Renforcement du béton par les matériaux composites » mémoires de master, université de Tébessa /2016. 126 p.

[28]. **Ali Ahmed C.** « optimisation des paramètres de réhabilitation, par les matériaux composites, de structures endommagées : techniques- expérimentation et modélisation ». thèse de doctorat, 2016.

[29] **BOUZBOUDJA Fatma.** « Poinçonnement de dalles armées de tissus composites ». Thèse de Doctorat, Université de Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2017, 151 p.

[30] **CROSTON Tania.** « Etude expérimentale du comportement d'une poutre en béton armé en flexion 3 points réparée par matériaux composites (approche probabiliste) ». Thèse de doctorat, Ecole nationale d'art et métier, centre de bordeaux. 24 p.

[31] **IGUENI Cylia.** « Caractérisation expérimentale du comportement de cylindres en béton, confinés avec des composites a base de fibres végétales ». Mémoire de master, université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2017, 99 p.

[32] **HIGHWAY AGENCY BD 79,** «Methods of Assessment for Bridges». September 2001. Level 4 and 5.

[33] **SILVA R.C.** « Contribution à l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé ». Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2004