

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة البليدة 1

Université de Blida 1



قسم الهندسة المدنية

Département de Génie Civil

Mémoire de Master2

Spécialité : Génie Civil

Option : Géotechnique

Sujet

**Modélisation d'une Infrastructure Maritime Renforcée
par Matériaux Composites**

Présenté par :

GUEMIRI Warda

Encadré par :

Dr M.ABDESSEMED

Soutenue le 06/09/2020 devant le jury composé de :

Dr. Sail Y

Président

Dr. Yahiaoui W

examinateur

Année universitaire : 2018-2019

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma famille et ma belle famille et particulièrement à ma mère, qui a beaucoup attendu ce jour, mon père, ma petite « *NADIA* », ainsi qu'à mon mari, qui m'a été un soutien moral et qui m'a soutenue tout le long de ce travail.

Remerciements

Mon éternel remerciement au Bon Dieu pour nous avoir donné la vie et la santé. Que le Bon Dieu nous protège.

Mes vifs remerciements à mon encadreur Dr. M. ABDESSEMED, Vice Recteur/Planification à l'Université Blida1, pour avoir cru en moi malgré tous les obstacles rencontrés, lors de l'élaboration de ce travail. Merci, du fond du cœur pour votre patience, votre volonté et votre soutien moral, dans les moments difficiles que j'ai passé. Je vous en suis très reconnaissante.

Je remercie aussi Mr Hamid, pour m'avoir aidé à maîtriser le logiciel Ansys et ses explications en matière de modélisation numérique.

Merci à Mr le Chef de service des ouvrages maritimes de la DTP de Tipaza de m'avoir fourni les données et les plans du cas d'étude.

J'exprime également ma gratitude à tous mes enseignants, qui ont contribué à ma formation, ainsi qu'aux membres jury, qui ont accepté d'examiner mon mémoire, malgré les moments difficiles causés par le confinement (Covid19).

Enfin, je ne serai jamais assez reconnaissante envers toute ma famille et ma belle famille, particulièrement mon mari Ramadhan pour son soutien, durant toutes les étapes de l'élaboration de ce mémoire.

ملخص:

تخضع الهياكل الخرسانية ، الواقعة في البيئات البحرية ، لأنواع عديدة من التدهور والهجوم و إعادة تأهيلها لا تعطي نتائج مرضية، خاصة وأن هذه البيئة غير مواتية للغاية. يتم استخدام المواد المركبة أكثر فأكثر لأعمال التعزيز، ولكن نادرا ما تطبق في بيئة شديدة الرطوبة. يتعلق الغرض من هذا العمل بنمذجة وتحليل سلوك جدار رصيف مصنف ضمن الجدران التي تعمل بوزنها، معزز بمواد مركبة، من خلال تطبيق طريقة العناصر المحدودة باستخدام برنامج ANSYS16.0. أظهرت الدراسة أن أداء المواد المركبة تعطي نتائج أفضل ، حتى في البيئات العدوانية ، على الرغم من تراجع مقاومتها.

الكلمات المفتاحية: الهيكل ، الخرسانة ، التعزيز ، المركب ، النمذجة ، العناصر المحدودة، البحرية ، الرصيف ، Ansys.

Résumé :

Les ouvrages en béton, situés dans les milieux marins, sont soumis à plusieurs types de dégradations et agressions. La réhabilitation de ces ouvrages ne donne pas de résultats fiables, surtout que ce milieu représente un environnement très défavorable. Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour les travaux de renforcement, mais très peu appliqués en ambiance fortement humide. L'objet du présent travail porte sur la modélisation et l'analyse du comportement d'un mur de quai poids, renforcé par matériaux composites et ce, par application de la méthode des éléments finies à l'aide du logiciel ANSYS16.0. L'étude a montré que les matériaux composites donnent de meilleurs résultats, même en environnement agressif, malgré la diminution de leurs résistances.

Mots-clés: Ouvrage, béton, renforcement, composite, modélisation, MEF, marin, quai, Ansys.

Abstract:

Concrete structures, located in marine environments, are subject to several types of degradation and attack. The rehabilitation of these structures does not give reliable results, especially since this environment represents a very unfavorable environment. Composite materials are used more and more for reinforcement works, but very few can be applied in a highly humid environment. The object of this work relates to the modeling and analysis of the behavior of a weight quay wall, reinforced with composite materials, by applying the finite element method using the ANSYS16.0 software. The study has shown that composite materials perform better, even in aggressive environments, despite their reduced strength.

Keywords: Structure, concrete, reinforcement, composite, modeling, MEF, marine, wharf, Ansys.

Table des Matières

Dédicaces	ii
Remerciements	iii
Résumé :	i
Liste des symboles et des abréviations.....	xi
Introduction Générale.....	xii
SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	1
I.1 Préambule	1
I.2. Statistique des infrastructures maritimes	1
I.2.1. Les ports :	1
I.2.1.1. Définition :.....	1
I.2.1.2. Types de port :.....	1
I.2.3 Classification des ports algériens :	4
I.3. Les types des ouvrages maritimes :.....	5
I.3.1. Les ouvrages intérieurs du port.....	5
I.3.2. Les ouvrages extérieur de port.....	6
I.4. Les quais	6
I.4.1 Définition des quais	6
I.4.1. Types des quais.....	7
a/ Quais poids	7
b/ Quai tailles dans la rocher	7
c/ Quai en maçonnerie et pierre ou en béton coule sur place	7
d/ Quai en bloc de béton de ciment ou en blocs de béton arme préfabriqué.....	8
e/ Quais en caissons échoues ou havees.....	9
f/ Quais en voiles de béton arme sur radier, sur semelle.....	9
g/ Quai en gabions de palplanches plates	10
- Quais écran : On peut citer ainsi les écrans de soutènement :	10
quais en rideaux de	10
palplanches (A) et en.....	10
parois moulées (B).	10
h/ Quais en parois moules	10

i/ Quais en palplanche	11
k/ Quais fonde sur pieux.....	12
I.3.3. Comparaison entre types de quais.....	13
I.3.4. Les fonctions assurées par les quais.....	13
I.4. Pathologie et types de dégradation des constructions maritimes :.....	14
I.4.1 Les dégradations d'origine mécanique	14
I.4.3. Les dégradations d'origine physique :.....	16
I.4.4.. Corrosion des armatures.....	16
I.4.5. Dégradation d'origine biologique :.....	18
I.5. TECHNIQUES DE REPARATION.....	19
I.5.. 1 1 ^{ere} Génération : méthodes classiques :.....	19
Le ragréage :.....	20
Béton projeté :.....	21
Injection d'epoxy :.....	23
Bétonnage sous l'eau :	23
I.5.2. 2 ^{eme} génération : les matériaux Géosynthétique :.....	25
Introduction.....	25
Définition :.....	25
Type des Géosynthétique :.....	25
I.5.3. 3 ^{eme} Génération : méthodes modérées et intelligente (nano-composite).....	29
Historique :.....	29
Différents types de composite argile polymère :.....	29
Conclusion:.....	35
MATERIAUX COMPOSITES	36
II.1 Généralités :.....	36
II.1.1 Introduction:.....	36
II.1.2 Définitions :.....	36
II.1.3 Les caractéristiques générales :.....	37
II.2. Les matrice :	39
II.2.1 Introduction :.....	39
II.2.2 Définitions :.....	39
II.2.3 Les résine.....	39
II.2.3.1 Différents types de résines:.....	39
II.3. Les charges et additifs :	42

II.3.1 Introduction:.....	42
II.3.2 Les charges:	42
II.3.3 Les Additifs:	43
II.4 Les fibres:	44
II.4.1 Introduction et définitions:	44
II.4.2 Les fibres de carbone:	45
II.4.3. Les fibres de verre:	48
II.4.4 Les fibres d'aramides	50
II.4.5. Les fibres de bore:	51
II.4.6. Les fibres de silice (ou de quartz)	51
II.4.7 Les fibres de polyéthylène de haut module :	51
II.4.8. Les Caractéristiques des fibres et renforts	51
II.5 Classification des matériaux composites:.....	52
II.5.1. Classification suivant la forme des constituants	52
Introduction:.....	52
Les composites à fibres :	52
Les composites à particules.....	53
II.5.2. Classification suivant la nature des constituants :	53
II.6. Différents méthodes de mise en œuvre des matériaux composites	55
II.6.1. Mise en œuvre par collage des lamelles :.....	55
II.6.2. Mise en œuvre par collage des tissus :	55
II.7. Application des matériaux composites dans le génie civil :	56
II.8. Paramètres d'influence sur la durabilité des matériaux composites :	57
II.8.1. Paramètres environnementaux.....	57
Température et humidité	57
Ultraviolet :	58
II.8.2. Paramètres liés aux matériaux :	58
La rugosité et la porosité du béton :	58
L'eau présente dans le substrat du béton :.....	59
La viscosité de la résine :	59
II.9. les avantage du renfort par matériaux composites :	60
Conclusion :	60
ANALYSE NUMERIQUE	63
III.1. Introduction	63

III.1.1 Méthode des éléments finis	63
III.1.2. Définition de la méthode des éléments finis :	63
III.1.3. Avantage de la méthode des éléments finis :	63
III.1.4. Choix du type d'élément et discrétisation :	63
III.1.5. Formulation des éléments finis:.....	63
III.1.6. Procédure d'analyse par éléments finis	64
III.1.7. L'enchaînement du programme d'éléments finis :	65
III.2. Présentation du logiciel ANSYS et principe du choix :	65
III.2.1. Introduction.....	65
III.2.2. Principaux produits et capacités	65
III.2.3. Plates formes ou environnements	66
III.2.4. Modélisation par ANSYS:.....	66
CAS D'ETUDE.....	68
IV-1. Introduction :	68
IV-2. Description du cas d'étude :	68
IV-3. Géométrie de l'ouvrage :	69
IV-4. Propriété des matériaux :	70
IV-4.1. Béton armé :	70
IV-4.2. Matériau composite :.....	71
IV-4.2. 1. Renforcement par lamelle :	71
IV-5. Maillage :	72
IV.6- Conditions aux limites.....	73
IV.7.Modélisation des composites :	74
IV.8. la pression hydrostatique :.....	75
Conclusion :	76
Résultats et discussion.....	79
V-1. Introduction :	79
V-2. Résultats obtenu par l'analyse statique par ANSYS :.....	79
V-3. Résultats numérique :.....	79
V-3.1. Mur de quai sans renforcement :	79
Figure V.4 Mur de quai avant renforcement.....	81
V-4. Comparaison et commentaires :.....	85
Conclusion :	87
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	88

Liste des Figures

Figure I. 1: plans de masse d'un Port	1
Figure I. 2: vu aérienne du port Sidi Frej Alger	2
Figure I. 3: Vue aérienne du port fluvial de Lille	2
Figure I. 4: Le port sec d'Oran Es Sénia	3
Figure I. 5: carte du littoral algérien	4
Figure I.6: maquette du port de madagh 'les éléments principale du port	6
Figure I.7: Port de la Pallice. Quai taille dans le rocher.....	8
Figure I.10: Quai en maconnerie de béton	8
Figure I.11:Quai en blocs de béton	9
Figure I.12:Quai en caisson [4]n Kanaaldok B1 port d'Aanvers, 1963	10
Figure I.13: Coupe d'un gabion (A), vue	10
Figure I.14:Quais en rideaux de palplanches (A) et parois moulées (B)	11
Figure I.15:Quai mixte	12
Figure I.16:Quai en rideau de palplanches	12
Figure I. 17:Quai sur pieux	13
Figure I.18 : Dégradation mécanique dus au frottement.....	16
Figure I.19: Dégradation dues à l'alcali-réaction.....	16
Figure I.20 : fissurations dues au gel-dégel.	17
Figure I.21. a : éclatement du béton dus a la corrosion des armatures.....	17
Figure I.21. b : Détérioration du Quai après 20 ans d'exposition.....	17
Figure I.21. c : évolution de la corrosion des armatures.	19
Figure I.22 : évolution des organismes sur la paroi d'un mur de quai.	20
Figure I.23. a : Réparation par ragréage	22
Figure I23. b : Réparation par béton projeté.	24
Figure I.24: Réparation par la méthode de la trémie	25

Figure I.25 : bétonnage sous l'eau	26
Figure I.16: Géotextile	26
Figure I.27: Géo-grille	27
Figure I.28: Géo-filet.....	27
Figure I.29:Géo-membrane.	27
Figure I.30: Géo-composite.....	27
Figure I.31: Géo-cellule.....	28
Figure I.32: Géo-maille.....	28
Figure I.33: micro composite (1) nano-composite intercalé (2) et nano-composite exfolier	31
Figure I.34: Définition morphologique de nano composites	32
Figure I.35: Géométrie des différents types de renforts	33
Figure I.36: Nano-composite produit par polymérisation d'un monomère in-situ.	34
Figure I.37: Elaboration d'un nano-composite en solution	35
Figure I.38: Exemple d'élaboration de nano-composites en masse	35
Figure II.2.2. : Structure moléculaire	40
Figure II.4.1 : Organigramme des différentes familles de fibre	48
Figure II.4.2.a.1 : Fabrication par carbonisation des fibres hautes résistance (HR)	49
Figure II.4.1.a.2 Fabrication par graphitisation de fibres hautes modules (HM)	49
Figure II.6.3 : Différentes systèmes de NSM.....	59
Figure II.8.1 : Influence de la température et de l'humidité sur les caractéristiques mécaniques d'une résine époxy	61
Figure II.8.2.a : Influence de la rugosité de substrats sur l'ancrage mécanique.....	62
Figure II.8.2: Comparaison des différentes modes d'observation de la zone de pénétration de l'adhésif dans la pâte de ciment :	63
Figure III-1: Modélisations de structures par éléments finis	66
Figure III-2: Organigramme des étapes d'un programme en éléments finis	65
Figure IV.2 .a : Coupe perpendiculaire a la falaise.....	70
Figure IV.2 .b : Situation du projet.....	70

Figure IV.3. Profil B-B du projet	71
Figure IV.3. Géométrie de l'ouvrage	71.
Figure IV.3.c: Vue de face.	72
Figure IV.3.d : vue de profil.....	72
Figure IV.3.e : vue oblique.....	72
Figure IV.3.f : vue supérieur	72
Figure IV.5.1 : création du maillage.....	74
Figure IV.5.2 : maillage du mur.....	74
Figure IV.5.3 : création des nœuds.....	75
Figure IV5.4 : aperçu des nœuds.....	75
Figure IV.5.5 : conditions aux limites.....	76
Figure IV.5.6 : support élastique.....	76
Figure IV.5.8 : l'application de la résine.....	76
Figure IV.9 : renforcement par lamelles.....	77
Figure IV.9 : schématisation de la pression.....	78
Figure IV.11 : application de pression hydrostatique.....	78
Figure V.1. Déformation du mur sans renforcement.....	81
Figure V.2. Déformation du mur sans renforcement en 3D.....	81
Figure V.3. Mur de quai avant renforcement	82
Figure V.4. Déformation du mur sans renforcement.....	82
Figure V.5. Déformation du mur après renforcement.....	83
Figure V.6. Déformation du mur avec renforcement.....	83
Figure V.7. Déformation du mur après renforcement.....	85
Figure V.8. Déformation du mur avec renforcement.....	85
Figure V.9: évaluation des valeurs des déformations pour les deux cas.....	86
Figure V.10 : graphe de comparaison de déformation entre les deux cas.....	86

Liste des Tableaux

Tableau I. 1: Les principaux ports Algériens avec leurs caractéristiques.....	5
Tableau I.2: Comparaison entre les différents types des quais	13
Tableau II. 2.3 : les différents types de composites.	39
Tableau II.2.3: Comparaison entre les types de résines.	44
Tableau II.4.2.b : Caractéristiques mécanique des fibre de verre.....	52
Tableau II.4.3.b : les propriétés mécanique des fibres d’aramides	53
Tableau II.4.7 : Les Caractéristiques des fibres et renforts:	55
Tableau II.5 : comparaison qualitative entre fibres... ..	58
Tableau IV.4: Propriétés de Béton armé	73
Tableau IV.2.1: Propriétés de CarboDur S1512.....	73
Tableau IV.2.2: Propriétés de la résine Sikadur-30.....	74
Tableau IV.3: Nombre des Nœuds obtenu par la discrétisation du mur	74
Tableau IV.4 : Nombre des éléments du mur.....	75
Tableau V.1 : valeurs de déformation et contrainte équivalente du mur non renforcé.....	79
Tableau V.2 : valeurs de déformation et contrainte équivalente	82
Tableau V.3. Comparaison des valeurs de déformations.....	86

Liste des symboles et des abréviations

CNT : Carbone nano tubes

E: East

E_c : Module d'élasticité

GTX : Géotextile

Géo :-grille

GMB : Géo-membrane

GCE : Géo-cellule

GGR : Géo-grille

H : hauteur du mur.

HM : haut module.

HR : haute résistance

K : coefficient de réduction.

MC : matériaux composites

MEF : méthode des éléments finis

MNCs : Les composites à matrice métallique

N: Nord

NC: nano composites

P : pression h hydrostatique.

PAN : poly-acrylonitrile

PRF : polymère renforcé des fibres

PRFC : polymère renforcé des fibres de carbone

PRFV : polymère renforcé des fibres de verre

PRFA : polymère renforcé des fibres d'Aramide

q : la charge de pression hydrostatique.

t: temps

TFC : tissu de fibres de carbone

TD : thermdurcissables

TP : thermoplastiques

W : West

ν : Coefficient de poisson

γ : Densité

μm : micro mètre.

Introduction Générale

Le renforcement des ouvrages est une préoccupation de plus en plus forte dans le domaine de génie civil en particulier en milieu maritime ou hydraulique, vu les conditions défavorables présentes et la complexité d'accès et l'état des dégradations apparentes. Plusieurs recherches se sont penchées dans le but d'optimiser les techniques de réparation afin d'obtenir de meilleurs résultats avec des méthodes efficaces, fiables et durables. Ces recherches sont basées sur l'utilisation des matériaux innovants tels que les composites à base de fibres (FRP) et plus particulièrement fibres de carbone (CFRP). Dans ce contexte, on s'intéresse au choix d'un modèle adéquat pour une analyse numérique d'un mur de quai poids posé sur le sable, sans fondation, renforcé par la géo-composite. Ce travail est scindé en deux grandes parties :

La première est composée de deux chapitres portant sur une étude bibliographique. Le premier chapitre recense une lecture statistique, pathologique des constructions maritimes, les types et causes de dégradations. Les trois générations de techniques de réparation et/ou renforcement sont présentées. La première génération qui regroupe les méthodes classiques telles que le chemisage, béton projeté, béton injecté,... etc. La deuxième génération, représente les matériaux composites, tandis que la troisième résume les méthodes modernes et intelligentes, telles que les nano-composite (CNT). Le deuxième chapitre est consacré aux matériaux composites, leurs utilisations et leurs applications dans les structures en béton.

Pour la deuxième partie, qui regroupe les chapitres III, VI et V. Le troisième est réservé au cas d'étude et l'analyse numérique, avec un choix adéquat du modèle. Le quatrième, donne un aperçu sur la méthode des éléments finis et le logiciel commercial ANSYS 16.0. La description du cas d'étude, d'ouvrage maritime, est présentée dans le chapitre V.

Les résultats obtenus et la discussion de cette analyse numérique, sont présentés, sous forme de séries de graphes de moments fléchissant, des déplacements et des contraintes. Les conclusions à tirer et les recommandations sont présentées à la fin du manuscrit.

Synthèse bibliographique

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Préambule

Les milieux maritimes et fluviaux sont caractérisés par la présence d'eau plus ou moins saline et par une atmosphère humide. Les ouvrages qui se trouvent dans ces milieux subissent de nombreuses agressions (mécanique, chimique, physique et biologique). La corrosion des armatures est aussi une des causes principales de la dégradation des structures en béton armé, plus particulièrement en milieu marin. Le béton peut être soumis à une ou plusieurs agressions simultanément, et le degré d'agressivité varie suivant que le béton soit totalement immergé, en zone de marnage ou hors d'eau.

I.2. Statistique des infrastructures maritimes

I.2.1. Les ports :

I.2.1.1. Définition :

Un port est une infrastructure maritime ou fluviale conçue par l'homme sur le littoral, les berges d'un lac ou sur un cours d'eau ; comme il existe aussi sous forme d'un abri naturel. Ces infrastructures sont munies d'ouvrages et d'installations nécessaires pour accueillir des bateaux et des navires transportant des passagers et des marchandises. Il comporte ainsi d'autres installations associées à ce trafic qui permettent le stockage, l'entretien, la réparation...etc.

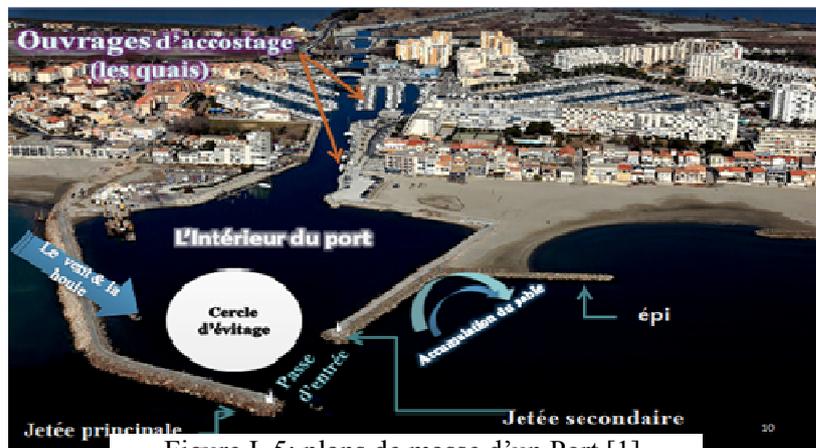


Figure I. 5: plans de masse d'un Port [1].

I.2.1.2. Types de port :

a) Selon leurs localisations :

Les ports maritimes : Implantés sur les côtes des mers ou d'océans. Ce sont souvent les principaux ports d'un pays ayant une façade maritime. Ils participent dans le commerce extérieur et intérieur. Ces ports ont besoin plus de protection et de réparation que les autres types car c'est les plus exposés aux conditions défavorables comme étant les vagues, le vent, les eaux salées...etc.



Figure I. 6: Vue aérienne du port Sidi Frej Alger [1]

Les ports fluviaux : Ce sont des ports intérieurs. Construit sur les bords des fleuves, Canales ou rivières. Souvent aménagés sur des élargissements naturels du cours d'eau pour que le courant n'empêche pas ses activités. D'autres ports de ce type peuvent être considérer comme étant des ports maritimes à cause de leurs situations au près des embouchures des grands fleuves qui permettent le passage à des navires venant de mer.

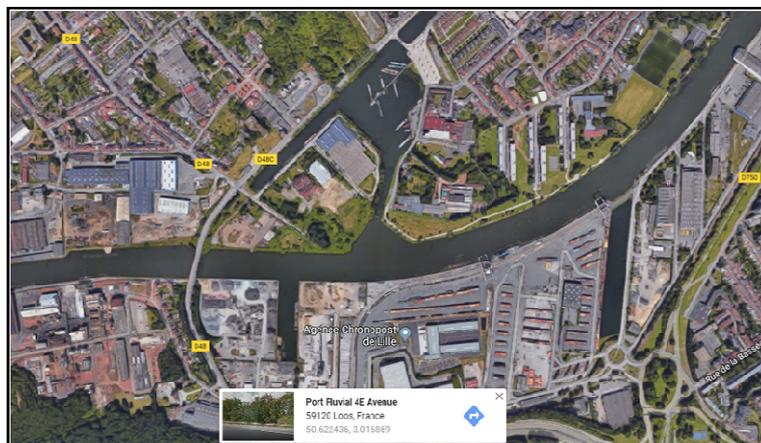


Figure I. 7: Vue aérienne du port fluvial de Lille [1]

Ports lacustres : Se sont des ports qui sont moins soumis aux aléas et surtout pas à ceux de la mer vu leur localisation sur les bordures des lacs. Mais il reste le problème des vagues sur les grandes étendues d'eau. Ces ports la comprennent les petites marinas et aussi des ports de commerce comme sur les grands lacs du Nord-Américain.

Ports à sec : Récemment créés (apparus dans les années 1960 aux États-Unis), ils permettent de stocker à terre de petites unités telles que les voiliers de plaisance et les yachts. Ces « ports » sont réalisés près des ports commerciaux ou au moins d'une cale de mise à l'eau. ce terme

désigne un lieu de collecte et de distribution des marchandises et l'existence des fonctions portuaires correspondantes, y compris les services de dédouanement, inspection douanière. Le pool géographique des entreprises et des organisations indépendantes impliquées dans le transport de marchandises (transitaires, expéditeurs et transporteurs); le paiement des taxes, l'entreposage, la maintenance et la réparation...etc.



Figure I. 8: Le port sec d'Oran Es Sénia [1]

b) Selon leurs activités :

Multiplés types des ports existent selon ce critère et parmi ces derniers on distingue :

Les ports commerciaux : Dans le but d'accueillir les bateaux et les navires de commerce. Il inclut ainsi le trafic de passagers sur les ferries et les paquebots et le transport de marchandises pour les navires cargo. Les marchandises transportés sont de tout genre que sa soit liquides (pétroliers, chimiquiers) et cela nécessite des réservoirs et tuyauteries dédiées ; aussi en état solides, en vrac (vraquiers, nécessitant des silos ou des espaces de stockage) ou emballées : cargos mixtes ayant besoin d'entrepôts et de grues, ou les porte-conteneurs avec les grands espaces de stockage associés. Les cargaisons roulantes (pour les rouliers) ont besoin de zones d'attente, éventuellement de parkings. Outre les espaces de stockage, un port de commerce doit aussi contenir des liaisons routières et ferroviaires, pour assurer le transport de tout se qui entre au port vers le reste de la terre.

Les ports de plaisance : Accueillent les bateaux de loisir et de compétition, qui peuvent être à voile ou à moteur. Généralement ces bateaux sont de petite taille (inférieur à 20 m). Ces ports sont souvent situés près du centre des villes pour des raisons touristiques et pratiques dans ces infrastructures la on trouve une capitainerie, les services d'avitaillement, de réparation, une pompe à carburant, et divers services d'équipages.

Les ports militaires ou ports de guerre : Destinés aux navires de guerre, la plus part de ces ports sont fermés et interdit aux publics pour des raisons de sécurité mais reste certains ouverts. Les infrastructures maritimes militaires sont beaucoup plus grandes que les autres. Ils comportent des chantiers de réparations ; des logements, des terrains d'entraînement et des moyens de ravitaillements. Comme ils peuvent aussi inclure un arsenal et une école navale.

I.2.3 Classification des ports algériens :

Les ports algériens sont repartis en trois catégories : Principale, secondaire importante et petit port secondaire

Tableau I. 3: Les principaux ports Algériens avec leurs caractéristiques.

Région	Wilaya maritime	Ports	Coordonnées géographiques	Caractéristique du port
Centre	Alger	Alger	03°02'00 E 36°50'00 N	Mixte (pêche+plaisance)
	Tipaza	Bouharoun	02°39'35 E 36°37'55 N	Pêche
		Cherchell	02°11'17 E 36°36'36 N	
		Tipaza	02°11'24,5E36°36'44N	Mixte (pêche+plaisance)
Est	Jijel	Jijel	04°65'00 E 36°95'00 N	Pêche
		Ziama Mansouria	05°29'00 E 36°40'36 N	
	Skikda	Stora	06°53'50 E 36°53'90 N	
		Annaba	Annaba	07°46'00 E 36°54'30 N
	El Taref	El kala	08°26'30 E 36°42'00 N	Pêche
Ouest	Mostaganem	Mostaganem	00°05'00 E 35°56'00 N	Mixte (pêche+commerce)
	Oran	Oran	00°39'09 W 35°43'00 N	Pêche
	Tlemcen	Ghazaouet	01°52'00 W 35°06'00 N	Mixte (pêche+commerce)
	Ain Temouchent	Béni Saf	01°10'2W 35°10'1N	Pêche
		Bouzedjar	01°10'00 W 35°34'20 N	

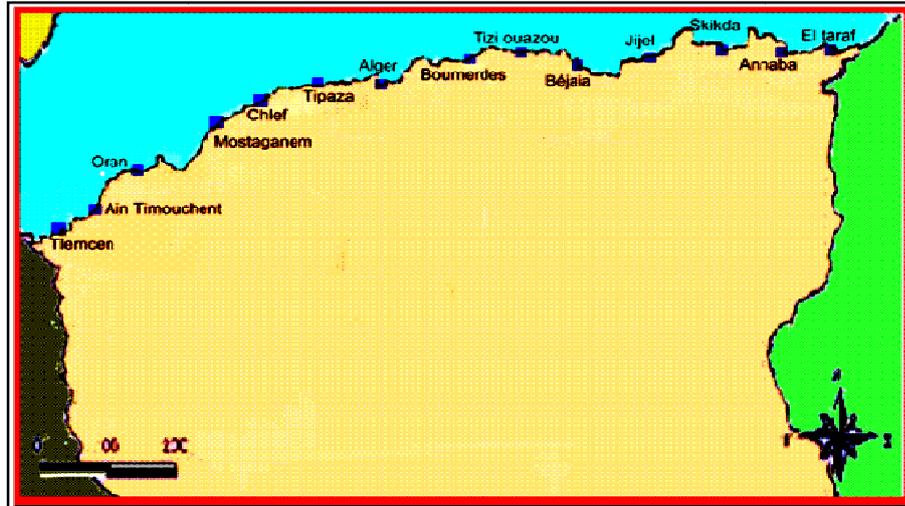


Figure I. 5: carte du littoral algérien [1].

I.3. Les types des ouvrages maritimes :

I.3.1. Les ouvrages intérieurs du port

Constituer pour que les navires et les bateaux peuvent stationner en toute sécurité sans être agressés par l'agitation des vagues et du courant marin. Ainsi que tous les engins qui transportent les marchandises et les grues flottantes qui les chargent et déchargent, et pour cela plusieurs ouvrages ont été réalisés dans le but d'assurer cette sécurité et parmi eux on site

- Les ouvrages d'accostage et d'amarrages :

Les murs de quais : C'est la structure opposée à la mer qui généralement accueille en premier tout type de choc et les plus graves même. Il assure la sécurité de tout ce qui est stationné à l'intérieur du port. Les quais sont aussi des ouvrages qui permettent la liaison directe entre les navires et les infrastructures terrestres du port.

Les appontements : C'est la partie qui comporte les équipements de stockage et de cargaison, ils peuvent ainsi servir comme dépôt. Cet ouvrage ne assure pas la liaison avec la partie terrestre mais il peut permettre l'accueil et le stationnement des bateaux.



Figure I.6: maquette du port de madagh 'les éléments principale du port [1].

Les ducs d'Alba : Qui sont des ouvrages ponctuels permettant l'accostage et/ou l'amarrage des navires. Ils ne disposent pas de plate-forme sur laquelle peuvent être déposées les marchandises ou être installés des engins de manutention. il existe deux types souples et rigide ils sont employée en groupe de minimum de deux devant les appontements. Ce type est utilisé beaucoup pour les ports pétroliers et méthanier.

- Les ouvrages de protection et d'accès :

Les ouvrages qui assurent la sécurité sont les digues et ces derniers ont plusieurs rôles qui sont :

- refugier les bassins portuaires de la houle
- Protéger le chenal d'accès à un port de la houle et des courants
- Diminuer l'ensablement du chenal d'accès.

I.3.2. Les ouvrages extérieur de port

Suivant la conception des ouvrages de protection contre la houle, qu'on va appeler par la suite « digues », on distingue généralement trois types principales.

- Les digues verticales,
- Les digues à talus,
- Les digues mixtes.

I.4. Les quais

I.4.1 Définition des quais

Les quais sont des ouvrages d'accostages donc ont pour rôle d'offrir aux navires une opportunité de se stationner et procéder à des opérations de transbordements de marchandises ou de voyageurs, d'avitaillement, d'armements ou enfin pour attendre la libération d'un poste d'opération.

Donc Un quai est un ouvrage remplissant les trois fonctions d'accostage et amarrage, de liaison avec la terre et de soutien des terres [2].

I.4.1. Types des quais

Il existe plusieurs types de quai suivant leurs conditions de mise en œuvre et de possibilité d'exécution, ils comportent une variété encore plus grande d'ouvrages, certains rattachables à la catégorie des ouvrages poids, d'autres non.

a/ Quais poids

Ces ouvrages sont aussi appelés ouvrages massifs ou bien lourd. Ils assurent le soutènement des terres et leur stabilité d'ensemble est assurée par leur poids propre et présentent une fondation qui est continue.

b/ Quai tailles dans la rocher

Dans le cas du sol rocheux, il est possible d'utiliser se sol lui-même pour constituer l'ouvrage d'accostage. Le rocher est alors taillé, revêtu en béton de ciment ou en maçonnerie, de

Façon a présenter un front d'accostage régulier; ce parement doit être efficacement ancré dans le sol pour éviter tout risque de décollement ; une attention particulière doit être apportée à l'évacuation des écoulements d'eau par les fissures de la roche.

Ce type d'ouvrages est économiques, mais la taille du rocher est souvent délicate, et de toute façon, les circonstances favorables à leur utilisation sont rares [1].

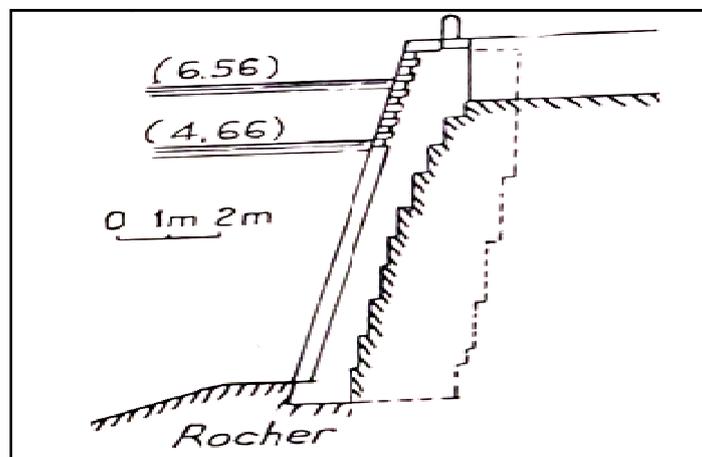


Figure I.7: Port de la Pallice. Quai taille dans le rocher.[1]

c/ Quai en maçonnerie et pierre ou en béton coule sur place

Les ouvrages de ce type sont conçus sous la forme de murs massifs en maçonnerie de pierre ou en béton de ciment. L'emplacement de l'ouvrage est dragué avant la construction de la maçonnerie.

.Afin d'éviter de perturber l'équilibre du sol qui risque de causer des désordres a l'ouvrage construit (décomposition du sol, risque de glissements d'ensemble).

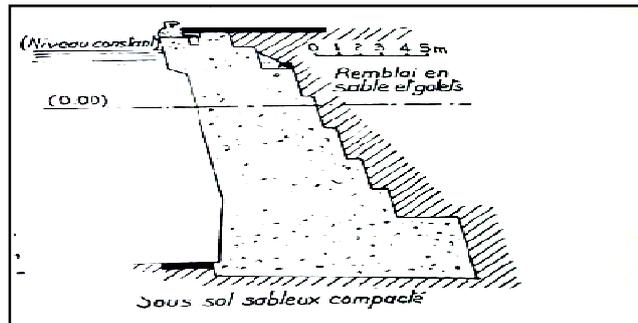


Figure I.8: Quai en maçonnerie de béton
Kanaaldok B1 port d'Aanvers, 1963 [1]

d/ Quai en bloc de béton de ciment ou en blocs de béton arme préfabriqué

Le mur des quais peut être constitué en bloc de béton, préfabriqués pleins ou évidés, empilés les uns des autres [2].

L'empilage peut s'effectuer aussi par assises imbriquées ou par piles juxtaposées. Ces assises imbriquées permettent d'assurer une meilleure répartition des efforts locaux provenant d'un tassement de la fondation, d'une poussée plus forte, ou de la réaction des amarres. Mais il faut noter que les piles juxtaposées permettent une reprise assez facile de l'ouvrage en cas de désordres limités : les piles produisent un tassement préalable sous chacune d'elles et peuvent ensuite être reprises en position définitive. Cette disposition paraît être préférée pour les ouvrages de grande hauteur, d'autant plus que le tassement peut être accéléré par une charge temporaire de chaque pile au moyen de blocs.

Les blocs sont de plus souvent de forme parallélépipédique sauf ceux de certaines assises qui comportent des chanfreins du côté du remblai pour former une chaise, ou ceux de l'assise de base qui comportent un patin. On peut être amené à les solidariser entre eux par des systèmes à tenon et encoches ou par des armatures métalliques (rails) dans des puits verticaux, de la même façon que les assises de grandes digues verticales, pour éviter le glissement relatif des assises.

Il est possible tout de même d'envisager des blocs de formes parallélépipédiques, mais comportant des évidements à leur partie antérieure pour reporter la charge verticale du côté du remblai et améliorer le centrage de la résultante sur la base.

Le couronnement des quais en blocs est toujours constitué par une poutre en béton coulée sur place, coupée de joints de dilatation et de retrait dans laquelle sont fixés les bollards ; des armatures sont souvent nécessaires pour cette poutre résiste aux efforts de torsion et de flexion dus à la réaction des amarres [1].

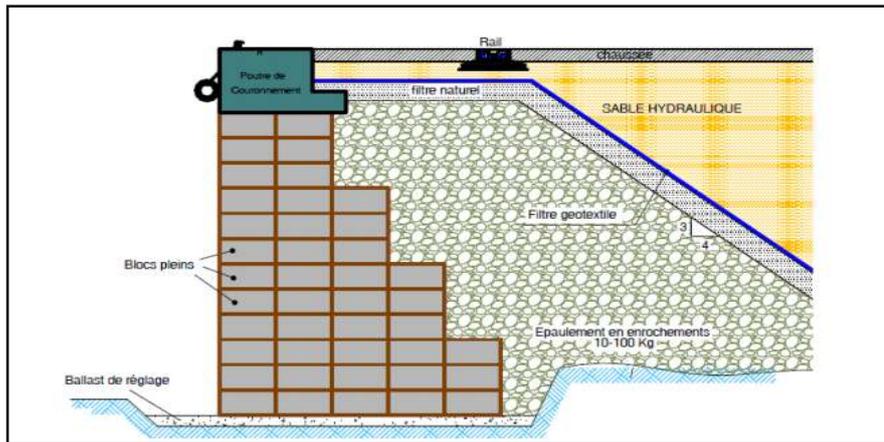


Figure I.11: Quai en blocs de béton [2].

e/ Quais en caissons échoués ou haves

Les caissons sont généralement préfabriqués et constitués de cellules de forme cylindrique ou parallélépipédique, qui sont remplies avec un remblai, ils peuvent atteindre des hauteurs de 30m voire plus [2].

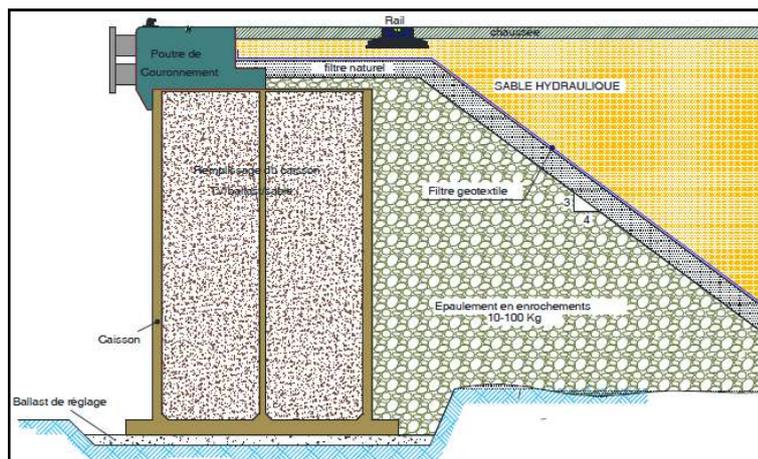


Figure I.9: Quai en caisson [2]

f/ Quais en voiles de béton arme sur radier, sur semelle

Ces quais se rapprochent des quais continus en caissons cylindriques échoués dont le radier serait conservé, la partie arrière supprimée, la partie avant aplanie et les parties latérales transformées en contrefort. Ils ont généralement de 14 m de hauteur; c'est le cas du quai à Gand.

La résistance du mur au glissement horizontal est améliorée par un ancrage réalisé par une bêche qui est même constituée d'une forte poutre. Grâce à un patin les contraintes sous l'arête de la semelle sont réduites tout en assurant une meilleure répartition des charges sur la fondation.

Si l'épaisseur du voile antérieur est relativement faible (80 cm), il est prudent de prévoir un front d'accostage en surplomb par exemple en faisant déborder de tête en avant du voile de

façon à éviter que ce dernier soit endommagé par le choc d'un navire. Ces ouvrages sont fondés en surface.

g/ Quai en gabions de palplanches plates

Ces palplanches trouvent leur utilité dans la stabilité des terres telles que le blindage

Des fouilles, la réalisation de rideaux cylindriques ou la mise en place de rideaux de grande profondeur. De plus, ces palplanches sont très utilisées dans le cas de terrain où l'ancrage est rendu difficile par la présence de roche. Elles sont utilisées principalement pour

Reprendre aux efforts de traction horizontale de l'âme [3].

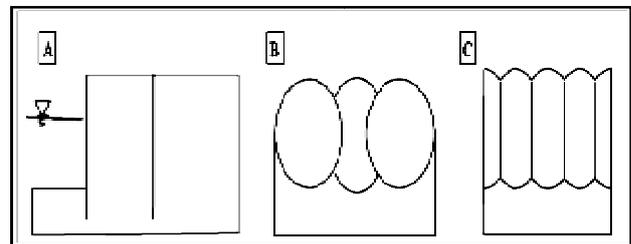


Figure I.10: Coupe d'un gabion (A), vue en plan d'une gabionnade avec arcs de raccordement (B)

- Quais écran : On peut citer ainsi les écrans de soutènement :

quais en rideaux de

palplanches (A) et en

parois moulées (B).

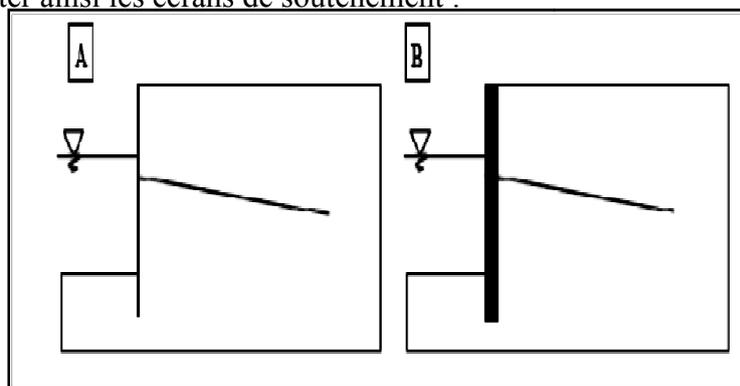


Figure I.11: Quais en rideaux de palplanches (A) et parois moulées (B) [3]

h/ Quais en parois moules

Les quais en parois moulées planes sont constitués par un écran frontal plan en paroi moulée, buté ou encastré en pied, et ancré sur un ou deux niveaux par des tirants passifs ou actifs. L'utilisation de la paroi moulée exige un site de construction terrestre, qui peut être obtenu par remblaiement préalable, sous réserve qu'il soit suffisamment compact. Les couches dures ne gênent pas la perforation.

Par contre, la présence d'une couche de galets très perméable exige des précautions (perte de boue, risque d'éboulements). En bassin marnant, l'étanchéité entre les joints doit être particulièrement soignée pour éviter la fuite d'éléments fins sous l'effet des gradients d'écoulement. Donnes l'exemple du quai de type paroi moulée de 450m construit en 1992-93 dans le bassin du Pacifique au Havre pour la réception des grands navires porte-conteneurs; sa réalisation a exigé un rabattement de nappe profond pour la pose des tirants [3].

i/ Quais en palplanche

- Quais a tirants (Quai en palplanche à module)

Les quais constitués par une paroi moulée en béton ou par un rideau de palplanches métalliques ancré sur un rideau arrière, sont utilisés lorsque le terrain naturel offre une portance insuffisante pour supporter un ouvrage massif, mais possède des caractéristique géotechniques permettant d'offrir une butée au pied du rideau (côté bassin) capable d'équilibrer la poussée du remblai. C'est le cas des sols sableux, de marnes ou d'argiles suffisamment compactes [1].

- Quais danois (Quais Mixte)

Le quai "danois" est constitué d'un rideau de palplanches et d'une plate-forme en béton armé fondée sur des pieux en béton ou en acier. La résistance aux efforts d'accostage est assurée par la poussée du remblai contre le rideau et, éventuellement, par la réaction horizontale de pieux inclinés. Les efforts verticaux sont équilibrés par les réactions verticales des pieux qui supportent la plateforme et, éventuellement, des tubes métalliques insérés dans le rideau de palplanches. Ces quais sont indiqués quand le sol de fondation est de qualité moyenne et qu'il existe une couche de terrain de bonne résistance à une profondeur raisonnable.

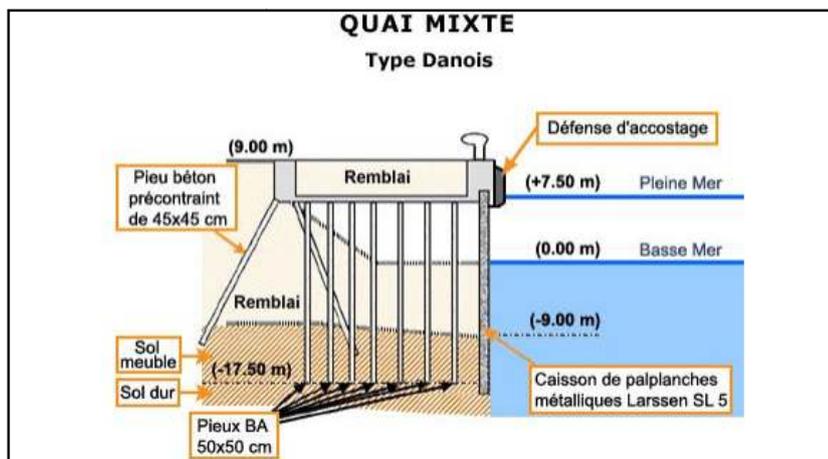


Figure I.12:Quai mixte [3].

j/ Rideaux plans

Ils sont utilisés quand le terrain naturel offre une portance insuffisante pour supportés un ouvrage massif, qui possède des caractéristique géotechniques assurant une butée au pied du rideau capable d'équilibrer la poussée de remblai. Cas des sols sableux, de marnes ou d'argiles suffisamment compactes [2].

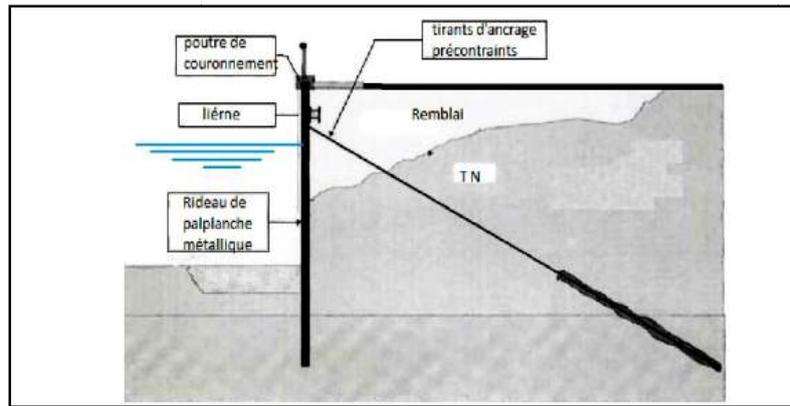


Figure I.13:Quai en rideau de palplanches [1].

k/ Quais fonde sur pieux

Les quais constitués par une plate-forme en béton armé supportée par des pieux (ou piles) en béton ou en acier, sont utilisés quand le terrain naturel est constitué d'une couche de mauvaise qualité sous laquelle existe une couche de terrain de portance suffisante à une profondeur pas trop importante. Des pieux inclinés et la butée offerte par la partie supérieure du remblai permettent de mobiliser une force horizontale suffisante pour équilibrer l'effort engendré par l'accostage et l'amarrage des navires.

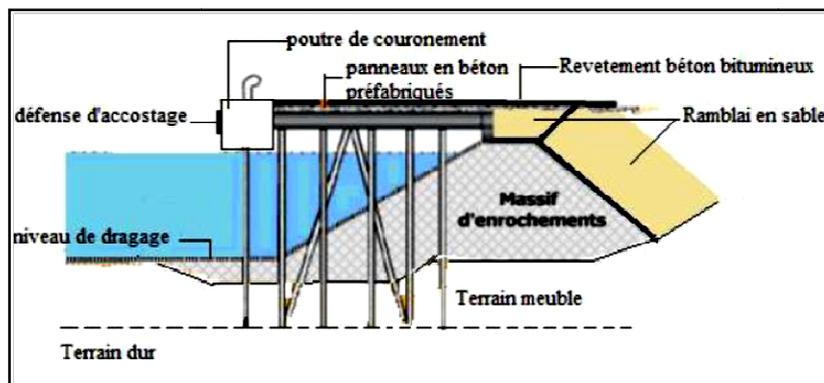


Figure I. 14:Quai sur pieux [1]

Réalisation d'un quai sur pieux Les principes éléments de la structure sont :

- les pieux : tube d'acier remplis de béton, battus au refus jusqu'au substratum.
- La plate-forme : reprise des efforts verticaux et lien structurel entre les pieux. Elle

Est formée d'un réseau triangulaire, une poutre et une dalle en béton armé.

- Le mur d'arrière-quai : appui latéral sur le remblai et des charges ponctuelles importante sont répartie dans la plate-forme introduite par, les pieux et les tirant sous laquelle se trouve un rideau en palplanche [3].

I.3.3. Comparaison entre types de quais

Tableau I.2: Comparaison entre les différents types des quais

Types	utilisation	avantages	inconvenient
blocs	-profondeur<12m -non disponibilité de moyens spéciaux	-réalisation facile -moyens conventionnels -durabilité	-conditions géotechniques requises -délai d'exécution lent
caissons	-profondeur>10 -disponibilité de moyens spéciaux	-réalisation rapide -absorption de charges importantes	-conditions géotechniques requises -moyens spéciaux
Parois moulés	-toute profondeur -exécution à sec	-réalisation rapide -absorption de charges importantes -économique	-corrosion de l'acier -conditions géotechniques requises -moyens spéciaux
Rideau de palplanches	-profondeur et charges non exceptionnelles -exécution à sec	-réalisation rapide	-corrosion de l'acier -condition géotechniques requises
Gabions de palplanches	-profondeur et charges moyennes -réalisation en mer	-économique en cas d'indisponibilité du béton	-corrosion de l'acier -conditions géotechniques requises
pieux	-toute profondeur et toute charge -postes isolés	-indépendants conditions géotechniques -réduction de l'agitation résiduelle	-corrosion de l'acier -coût excessif

I.3.4. Les fonctions assurées par les quais

Par définition, un quai est un ouvrage intérieur du port qui assure les fonctions essentielles que sont :

- Se munir d'un dispositif d'appui pour permettre d'accostage et d'amarrage des navires.
- Assurer une liaison entre la terre et le navire qui est assurée par un terre-plein des quais. Le dispositif de liaison supporte donc une partie ou tout le matériel de manutention servant à la réception et au transport des marchandises ou les voyageurs.
- Soutenir les terres en arrière du front de quai à la limite du plan d'eau. ce soutien des terres peut faire intervenir l'ouvrage lui-même ou un ouvrage accessoire, par exemple un talus d'enrochement. La liaison n'est pas seulement assurée par l'ouvrage d'accostage mais aussi par les Terre-pleins situés en arrière de l'ouvrage.

Le dispositif de liaison supporte les engins de manutention et les aires de stockage, qui

Peuvent comporter des hangars, des terre-pleins, des chaussées et des voies ferrées. Donc une partie qui sert à la réception et au transport des marchandises ou les voyageurs.

I.4. Pathologie et types de dégradation des constructions maritimes :

Les bétons sont les matériaux les plus utilisés dans la réalisation des ouvrages maritimes. Ces ouvrages sont exposés aux différents types d'agression, qui eux-mêmes provoquent des dégradations variées selon la variation du niveau de la mer.

a) Ouvrage totalement immergé :

C'est le cas où tout le béton est situé au-dessous du niveau de la mer. Ce type de béton ne risque pas de grand désordre grâce au manque d'oxygène, qui est l'élément principal dans la production de la corrosion. Vu que c'est le responsable sur la pénétration de la chlorure de l'eau de mer dans le béton même si que cette dernière dépasse le seuil mais une fois le béton est saturé

b) Partiellement immergé : (tout dépend du niveau de la mer haute ou basse).

Ce béton est soumis au cycle séchage-mouillage. Ce qui provoque une présence suffisante d'oxygène et de chlorure entraînant la corrosion des armatures. Cette zone est classée parmi les plus défavorables vis-à-vis de la durée de vie des structures. Tout cela n'est qu'additionné aux autres contraintes plus le phénomène du gel-dégel.

c) Complètement hors des eaux

Le béton situé au près des eaux de mer n'est pas en contact direct avec ces eaux. Mais le brouillard et l'humidité marine transportent les sels à ces ouvrages et cela provoque une légère agression de corrosion. Ces ouvrages ne subissent pas les dégradations dues aux actions des vagues.

Les parties d'ouvrages marins les plus exposées aux dégradations dues aux actions de l'eau de mer sont :

- Les piles et les culés des ponts situés en zone de marinage,
- Les blocs de défense maritime,
- Les murs de quais.

I.4.1 Les dégradations d'origine mécanique :

Les infrastructures maritimes sont exposées aux différents types d'agression mécanique, selon leurs fonctionnements. Parmi lesquelles on cite celles qui reprennent les efforts d'amarrage, d'accostage et toute catégorie d'efforts générés par la houle. Aussi les ouvrages soumis au chargement et déchargement et au endommagement dus aux chocs et au frottement des navires et tout corps flottant.

La durée d'application de ces sollicitations différentes l'une à l'autre. Elle peut être courte ou longue, et diffère aussi du point de vue de l'intensité. Tous ces chocs provoquent généralement des fissures et des éclatements du béton.[4]



Figure I.15 : Dégradation mécanique due au frottement.

I.4.2. Les dégradations d'origine chimique :

La position du béton en un milieu marin l'expose à plusieurs types de réaction chimique qui cause la dissolution du liant.

a) Attaque par la réaction d'alcali-réaction :

C'est une réaction interne entre la solution alcaline présente dans les interstices du béton et un de ses composants (certains granulats). Cette réaction crée un gel expansif causant un gonflement qui à son tour conduit à des fissures et des éclatements du béton. Ce type de réaction ne se produit pas uniquement dans les environnements marins. Mais il nécessite juste la présence d'eau.

Les trois facteurs principaux qui provoquent ce phénomène sont :

- La présence des granulats partiellement ou totalement réactifs.
- Solution interstitielle concentrée en alcalins.
- Tôt d'humidité suffisamment élevées.

La dégradation due à cette attaque est plus grave dans la zone immergée, zone de marées et dans les environnements humides. Là où il y a contact direct ou indirect avec l'eau.

b) Attaque sulfatique d'origine externe :

Les sels de sulfate que soit de magnésium ou d'alcalin sont présents dans l'eau de mer et en plus sont très agressifs envers le béton. D'où il réagit avec le portlandien et cause la dissolution du liant ou réagit aussi avec l'aluminate tricalcique (provenant du clinker) en causant des gonflements. Ce phénomène se produit dans les climats froids.



Figure I.16 : Dégradation due à l'alcali-réaction.

I.4.3. Les dégradations d'origine physique :

Les dégradations d'origine physique notamment dus au phénomène du gel-dégel qui se produit lorsque la température extérieure décent au dessous de -3° les eaux interstitielles dans le béton gel et provoque une augmentation de volume qui atteint jusqu'à 9% du volume initiale et cela applique une pression hydraulique au niveau des pores causant des fissures. Une fois elle dépasse la résistance à la traction du béton.

Les parties du béton submergé ne sont pas la zone concernée par le gel-dégel. Mais plutôt celles qui sont dans les zones humides, car il se produit dans les climats froids et au le niveau de la mer est bas.



Figure I.17: fissurations dues au gel-dégel.

I.4.4.. Corrosion des armatures :

Le béton ne représente pas seulement le matériau résistant à la compression dans la composition des éléments de structure. Mais aussi il offre une protection naturelle a l'acier contre le milieu agressif et corrosif dans le quel il est installé.

La corrosion des armatures indique clairement la présence de la dégradation du béton. Se qui a permis la transition de l'oxygène et des chlorures a ces dernières. Le taux de corrosion due a la pénétration de chlorure dépend de la disponibilité d'oxygène. Très forte dans les zones partiellement immergées mais par conséquence, elle ne représente qu'un faible taux dans les zones continuellement immergées malgré la grande quantité de chlorure présente dans l'eau de mer.[5]



Figure I.18.a : éclatement du béton dus a la corrosion des armatures.



Figure I.18.b : Détérioration du Quai après 20 ans d'exposition.

a) causes de la corrosion :

- Pénétration des chlorures :

Dans les milieux marins la première et principale cause qui déclenche le phénomène de corrosion des armatures est la pénétration des chlorures dans les porosités du béton. Dans le cas des structures immergées (milieu saturé) cette pénétration se fait par diffusion. Une fois la concentration des ions CL^- dépasse le seuil estimé, le phénomène de corrosion se déclenche. La vitesse de pénétration des chlorures dépend de la perméabilité du béton, plus qu'elle est faible on a moins de pénétration. Ainsi que dans le cas contraire.

Les armatures des structures continuellement immergées présentent un faible taux de corrosion, malgré la concentration des chlorures très élevée. Cela est dû au manque d'oxygène dans l'eau de mer. Par contre dans les zones de marnages et toutes zones humides qui sont soumises répétitivement au cycle séchage mouillage absorbe suffisamment de chlorure ainsi qu'une bonne quantité d'oxygène le rend dans le cas le plus défavorable.

- Carbonations :

Ce phénomène représente la réaction du dioxyde de carbone qui existe dans l'air avec les hydrates du portlandien, se qui résulte des carbonates de calcium. Il entraîne une diminution du PH de la solution interstitielle et cela endommage les aciers. L'évolution de la carbonatation dépend de la perméabilité du gaz du béton (porosité) également aussi du taux d'humidité. Une humidité de 50% est très favorable à ce jour de réaction.

La carbonatation est très faible ou pratiquement inexistante dans les cas des structures immergées et cela est dû à la saturation des pores en eau. De la même façon, si l'ouvrage se trouve en un climat pratiquement sec. Il y aura pas part pour l'existence du gaz de carbone et cela est dus à l'insuffisance d'eau pour le provoqué. Le problème et les conséquences défavorables de cette réaction ne se présentent rapidement que dans le troisième cas. Celui des zones de marnage ou toute zone exposée au vent et à la pluie (zone humide).

b) Evaluation de la corrosion au cours du temps :

La corrosion des armatures est répartie en deux phases. La première est l'altération lente du béton, c'est à dire la destruction de la couche fine du béton qui protège les armatures. Elle prend la durée ou les agents agressives pénètre dans l'enrobage et atteint le métal sans le corrodé. Cette étape s'arrête lorsque la teneur de c'est agents atteint la valeur critique de corrosion au niveau de la surface des armatures.

La deuxième phase est celle de la diffusion ou de développement de la corrosion à la surface des armatures. Cela engendre un gonflement qui conduit a des fissures et des éclatement du béton. Les désordres induits conduit à une altération des performances mécaniques de l'ouvrage, affaiblissement de sa capacité fonctionnelle et nuisent son esthétique.

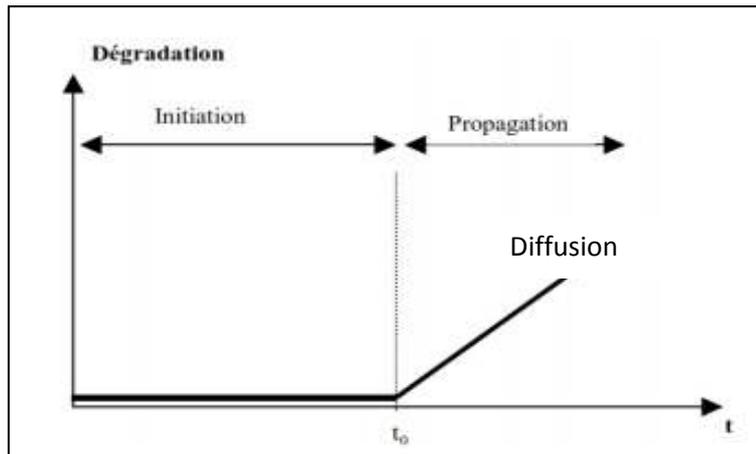


Figure I.18.c : évolution de la corrosion des armatures.

I.4.5. Dégradation d'origine biologique :

Différents corps organiques peuvent apparaître sur les zones immergées des structures maritimes ou même celles qui sont en zones humides. Ils sont classés en deux catégories, la première contient ceux qui développent une couche biologique dure tels que les huitres, les moules, les holothuries et les balanus perforatus. La deuxième catégorie englobe tous ceux qui créent les incursions molles, comme les gorgones rouges, les algues et les spongiaires. La croissance de ces organismes dépend de plusieurs facteurs liés à l'environnement de la structure comme l'emplacement géographique, l'intensité de lumière, le courant, la saison, la température des eaux, la profondeur et la concentration d'oxygène. Aussi ceux qui sont liés à la structure elle-même, tels que l'âge structurelle dans la mer et les caractéristiques surfaciques de la structure.

L'évolution des organismes cités au-dessus sur les surfaces du béton influe sur ses caractéristiques d'une manière dangereuse puisqu'elle cause des dégradations de ses caractéristiques et cela conduit à des fissurations et même des éclatements. Comme il peut être bénéfique puisque lorsqu'elle enrobe la structure d'une couche dure et imperméable. Dans ce cas elle oppose à la pénétration des chlorures et d'oxygène, et cela diminue la corrosion des armatures.



Figure I.19 : évolution des organismes sur la paroi d'un mur de quai.

I.5. TECHNIQUES DE REPARATION :

Pour les ouvrages maritimes, les opérations d'entretien ou de réparation peuvent être rendues très difficiles du fait des contraintes d'accessibilité, des marées, de la météo, etc. Le milieu environnant de l'ouvrage est le facteur déterminant la technique de réparation à préconiser. En effet, un ouvrage soumis au marnage et intégralement découvert à marée basse sera traité différemment d'un ouvrage soumis ou non au marnage avec des parties immergées en permanence. L'accessibilité sous les ouvrages maritimes est souvent délicate. La mise en place d'accès pour les traiter et les réparer est un des postes principaux dans un projet de réparation. Le fait de travailler « à la marée » limite les temps d'intervention et par conséquent augmente les coûts.

Les différentes techniques de réparation et de maintenance des ouvrages qui sont utilisées depuis de nombreuses années sont décrites ci-après.

I.5.. 1 1^{ère} Génération : méthodes classiques :

La réparation ou le renforcement des ouvrages maritimes est une des opérations les plus difficiles. A cause des contraintes d'accessibilité, les marées et les conditions climatiques. Le milieu qui entoure les ouvrages est le facteur décisif du choix de la technique de réparation à prendre en cas de dégradation. Car un ouvrage découvert à marée basse est traité différemment de celui qui est immergé en permanence.

L'accessibilité sous les ouvrages maritimes est limitée par le temps et cela augmente le coût des traitements et des réparations.

Les opérations de réparation ne tiennent compte que des contraintes particulières et du positionnement en site marin. Aucune recommandation, guide ou documentations n'existe sur ces sujets.

-
- *Ouvrages entièrement découverts à marée basse :*

Tous types de réhabilitation est possible dans ce cas vu l'accessibilité facile à ces site la. Mais elles sont guidés par le facteur temps. Une durée bien limité et imposé par le marnage, se qui conduit à éliminé les réparations sans aménagement spécifiques du fait que les opérations exige des durée très longue et incompressible.

- *Ouvrages partiellement immergées :*

Quelque soit soumis au marnage ou non, certaines techniques de réhabilitation tel que le chemisage ne sont pas possible qu'après installation des batardeaux. Car leurs réalisations ne se fait qu'à l'air sec

Cette méthode n'est applicable que pour les grands chantiers dont le facteur économique ne présente pas une contrainte. C'est un mode tares lourd

Parmi les techniques classiques les plus fréquentées on site :

Le ragréage :

C'est une des applications traditionnelles applicable en air sec elle consiste à appliqué un mortier hydraulique ou polémique sur les surfaces dégradées après les avoir traités cette méthode n'améliores pas les caractéristiques mécaniques dégradés de la structure. Mais elle est applicable pour :

- Rendre l'homogénéité esthétique de l'interface de l'élément dégradé,
- Maitre fin phénomène qui résulte la dégradation.

A fin de crée un support adhérent rugueux, propre et sain il faut bien traités les surfaces de reprise. Cette méthode n'est pas aussi durable et efficace que les autres. Mais c'est la plus économique parmi elles. Elle n'est appliquée que dans les zones de petite surface et isolée et aussi que pour les désordres liés à la corrosion des armatures.

Lors du traitement on doit tenir compte des variations du niveau d'eau. Le matériau utilisé pour le ragréage doit atteindre le minimum de ces caractéristiques lors de l'immersion. Afin de résister aux agents agressifs.[6]



Figure I.20.a : Réparation par ragréage [7]

Béton projeté :

C'est un béton appliqué par projection sous haute pression (très grande vitesse) sur la paroi qu'on veut renforcer de l'ouvrage. Il existe deux procédés de projection une par voie sèche et l'autre par voie humide.

Dans le premier cas, tous les matériaux composant le béton ne sont humidifiés que par une quantité d'eau minimum pour diminuer la poussière lors de la projection et a fin de minimiser la quantité du rebond. Ensuite le mélange est transporté par l'air comprimé jusqu'à la lance ou l'eau est introduit sous pression.

Pour le deuxième cas, les matériaux sont tous mélangé ensemble y inclus l'eau. Ce mélange peut se faire sur chantier ou a l'extérieur. En suite le béton est pompé jusqu'à la lance et injecté avec une grande vitesse à laide du jet d'un air sous haute pression.

Cette méthode aussi n'est applicable que dans un air sec. Pour les zones de marnage un accélérateur de prise est ajouté pour gagniez du temps. Le béton projeté n'est pas seulement utilisé pour le renforcement des infrastructures maritimes. Mais aussi pour plusieurs autres ouvrages, tel que les ponts, les bâtiments et aussi les excavations souterraines.

La différence entre les deux méthodes citées au dessus n'est pas dans les matériaux constituants puisque dans les deux cas c'est du béton. Elle est dans la chronologie des opérations.

Le béton projeté offre plusieurs avantages. Le plus grand parmi eux est la non nécessité du coffrage. Ce qui rend cette technique très applicable dans les endroits difficilement coffrable. Mais elle reste une opération délicate qui nécessite un personnel bien qualifié pour métriser et ajuster la pression, la quantité d'eau et l'uniformité de l'épaisseur de la couche projeté. De cela on conclu que le béton projeté est une technique qui à des avantages comme elle comporte des inconvénients que soit pour la voie sèche ou humide.[6]

- *Béton projeté par voie sèche :*

Avantage :

- la possibilité d'arrêter et de redémarrer le travail (en cas de nettoyage) ;
- Grande longueur des lances, ce qui permet d'installer les machines à projeté à une grande distance du chantier (centaines de mètres) ;
- La création d'une seule couche épaisse même sans utiliser les accélérateurs de prise ;
- Obtention d'une grande résistance améliorée grâce au gravier projeté par pression (l'effet de compaction).

Inconvénients :

- Rendement du travail limité.
- Trop de poussière dégagée de la machine et de la lance.
- Une perte importante.
- Teneur en eau visuelle (incertitude).

- *Béton projeté par voie humide :*

Avantage :

- Rendement de travail très élevé, qui peut atteindre le double et même le triple de celui de la voie sèche ;
- Conditions de travail bien améliorées (moins de poussière) ;
- Qualité du béton bien contrôlée ;
- Répartition homogène de la composition de la couche.

Inconvénients :

- Exigence de la régularité de la consistance et de la formulation (moins de souplesse) ;
- Distance de transfert limitée pour raison de difficulté ;
- Compactage faible ainsi que l'adhérence.

Dans le cadre d'optimiser la maintenance et la réparation des ouvrages il est nécessaire de contrôler et évaluer la durabilité de ces derniers et suivre la dégradation mécanique de ses éléments composants (béton-armatures).

Figure I.20.b : Réparation par béton projeté .[7]

Injection d'époxy :

C'est une technique de réparation qu'on peut appeler ancienne (utiliser de puis 1960). Très applicable dans les zones immergées ou de marnages, que soit les eaux salées ou douces. Elle consiste à injecter de l'époxy dans les fissures, et cela crée une liaison mécanique entre les parties disjointes et rend au béton son étanchéité. Les caractéristiques et les propriétés physiques des parties du béton renforcé par injection d'époxy sont compatibles avec celles du béton initial.

Les fissures dans le béton continuellement immergé dans l'eau contiennent de diverses matières telles que les sels dilués, des débris dus à la corrosion du métal ou des argiles, et cela entraîne une mauvaise adhérence. Si ces intrus ne sont pas retirés aucune résine époxydique n'est capable d'assurer le remplissage durable de ces fissures (problème d'adhérence).

Les réparations par injection d'époxy n'améliorent pas le niveau de portance à un niveau supérieur. Elle lui rend juste son fonctionnement initial. Comme elle peut aussi lui donner lieu à des désordres tels que :

- Les fissures stabilisées, dont les ouvertures n'évoluent pas. Appelées les fissures passives.
- Les fissures dont les ouvertures évoluent sous les actions du trafic, vent, température...etc. ou au cours du temps et celles-ci sont fissures actives.

Bétonnage sous l'eau :

La qualité du béton immergé dans l'eau diminue principalement à cause du délavage du ciment et des fines. Ainsi que la ségrégation. Pour cela en ce qui concerne le bétonnage sous l'eau nécessite de minimiser le contact entre la surface du béton et l'eau. Cette condition est basée sur le principe de la tuyauterie.

- *Béton pompé :*

C'est un béton pompé dans l'eau durant la réparation mais sa fabrication se fait en dehors de l'eau. Cette technique est moins compliquée que les autres. Elle consiste à un tuyau plus petit et très flexible. Se qui facilite l'accès aux lieux difficile.

- *Technique à la trémie :*

Cette méthode est la plus utilisée dans le cas de coulage. Elle diffère du béton pompé dans la technique de réalisation. Ou le béton est rempli dans la trémie et chute par sa propre pesanteur dans un ou plusieurs tubes rigides et lisses de l'intérieur. Relié à un autre tube permettant d'évacuer l'air sous le bouchon.

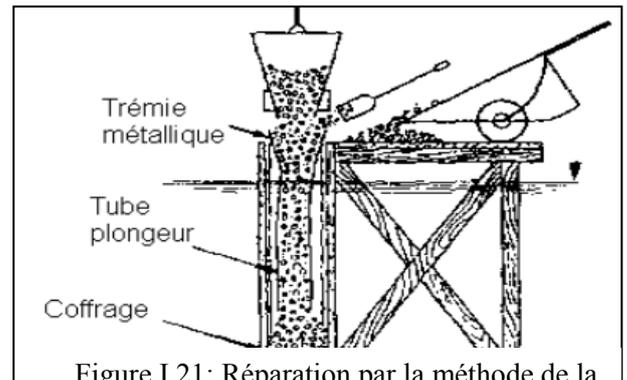


Figure I.21: Réparation par la méthode de la trémie

La technique de la trémie est convenable aussi pour la réalisation des ouvrages neufs ou la réparation des grandes surfaces qui se trouve à des profondeurs importantes ou la technique de pompage est impossible a adapté.

- *Bétonnage par chute libre :*

C'est un béton cohésif même dans l'eau, grâce à l'utilisation des adjuvants anti-lavage qui assure la mise en œuvre de ce béton en le laissant chuter librement sans utiliser aucune enceinte.

Le béton coulé par chute libre doit être d'une viscosité élevée, auto plaçant, auto-nivelant, super plastifiant et surtout d'une résistance élevée. Ce mode de bétonnage n'est applicable que pour les profondeurs moyennes, malgré son succès d'utilisation dans la plus part des cas traité.



Figure I.22 : bétonnage sous l'eau .

Conclusion :

Les ouvrages maritimes subissent le plus de dégradations que les ouvrages fluviaux ou ceux réalisés sur le terrestre. Ces dégradations dépendent de l'exposition à l'eau de mer, quelque soit mécanique, chimique, biologique, ou climatique. Elle se manifeste sous forme de fissures, éclat du béton ou la mise à nus et la corrosion des armatures.

Ces désordres qui peuvent être parfois sévère, diminuent la capacité de l'ouvrage donc sa durée de vie. Cependant pour réparer ces infrastructures plusieurs techniques ont été utilisées tel que le ragréage, béton projeté, injection d'époxy...etc. tout dépend du degré de dégradation et du positionnement des ouvrages. Pourtant ces solutions ne sont pas durables vu que les armatures utilisées dans le chemisage en béton projeté vont se corroder à nouveau et un autre mode de réparation sera nécessaire.

Pour cela, la recherche n'a pas été satisfaite et elle ne s'est pas arrêtée au niveau de ces techniques. Elle a développée une nouvelle génération de renforcement qui est plus résistante (chimique et physique) et en plus légère, permettant de réduire le temps de travail ainsi que la main d'œuvre. Ce qui permet une meilleure réparation en zone de marnage où le temps et l'accès sont les contraintes majeures. Cette génération est LES MATÉRIAUX COMPOSITES. Qui seront présentés dans le prochain point avec leurs applications dans les milieux humides et immergés. Ainsi que les paramètres pouvant influencer sur leurs collages.

I.5.2. 2^{ème} génération : les matériaux Géosynthétique :

Introduction :

Le Géosynthétique est un matériau qui a ces propres caractéristiques comme tous autres matériaux de constructions. Il n'est inclus dans le génie civil que récemment à partir des dernières soixante dernières années.

Définition :

Les Géosynthétiques sont des matériaux industriels fabriqués à base des polymères dérivés des huiles de pétrole. Ainsi que fibres de verre, le caoutchouc et autres matériaux. Ce terme de la Géosynthétique n'est qu'une appellation d'une très large gamme de produits.

Type des Géosynthétique :

Les principaux types des Géosynthétiques sont :

- Le géotextile :

C'est un polymère sous forme de feuille (structure plane). Il est caractérisé par sa perméabilité et sa flexibilité. Cette catégorie comprend plusieurs types, parmi lesquels on distingue :

- Géotextile tissé
- Géotextile non tissé
- Géotextile tricoté
- Géotextile pointé.

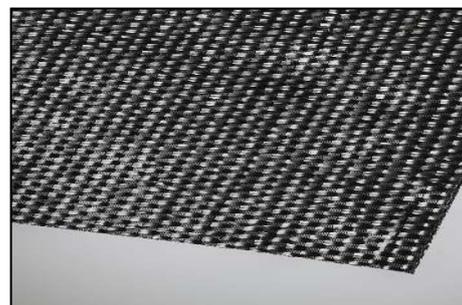


Figure I.22: Géotextile

- Gé -grille :

Fabriqué du même matériau de base que les géotextiles et possède aussi la même structure plane mais sous forme d'un réseau ouvert et régulier très résistant a la traction. Assembler par collage ou par entrelacement. L'espacement et les ouvertures sont plus grandes que la dimension de Ses élément constituant eux même. Les géo grilles se divisent en trois types, qui sont :

- Géo-grille expulsé uni axial ou bi-axial.
- Géo-grille collé.
- Géo-grille tissé.



Figure I.23: Géo-grille

- Géo-filet :

Dans la première vu les géo filets ressemble aux Géogrille mais ils sont différents du point de vu de la matière de base et du fonctionnement. Ce pendant les géo filets draine les gaz et les liquides.



Figure I.24: Géo-filet

- Géo membrane :

Feuille plane utiliser comme interface ou bien surface de contact a fin de gérer l'écoulement des liquide. Car c'est un matériau relativement imperméable.



Figure I.25: Géomembrane.

- Géo-composite :

C'est une appellation appliqué aux produits qui sont composé de deux matériaux ou plusieurs, parmi les quels au moine un est déjà un des Géosynthétique déjà citer au dessus. Qui est amélioré par les autres matériaux plus efficaces.

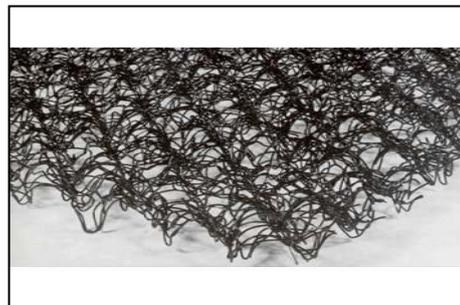


Figure I.26: Géo-composite.

- Géo-cellule :

Il existe deux types de Géo-cellule, il ya ceux qui sont rassemblés sur site en forment des carrés et d'autres formé en usine avec des bonde de polymère.

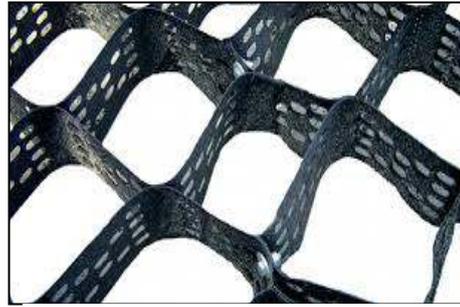


Figure I.27: Géo-cellule.

- Géo-mousse :

C'est un matériau semi- liquide sous forme de bloc à un contenu vide. Dans le bute d'une utilisation légère souvent employer pour l'isolation thermique et les conduites d'évacuation.

- Géo- natte :

C'est une structure tridimensionnelles, solide et perméable fabriqué a base des polymères. Caractérisé par leurs installation permanente a fin de limité l'érosion de la végétation

- Géo-maille :

C'est un des Géosynthétique tissé mais a des grands pores irréguliers. Qui varies de l'ordre des millimètres jusqu'à plusieurs centimètres. Ayant le rôle principale de la lutte contre l'érosion.

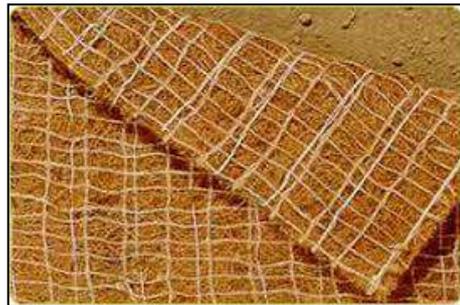


Figure I.28: Géo-maille

- Géo-pipe :

Ayant la forme d'un tuyau en plastique qui peut être lisse où pendulé, perforer ou non. Utiliser au sol et rempliai après son installation.

- Géo-entretoise :

C'est un Géosynthétique ayant une structure plate, d'une forme ondulé largement espacé.

- Géo-bande :

Formé en bonde.

La société internationale du Géosynthétique à recommandé des abréviations et des symboles signifiant pour chaque famille et types de ses produits. Le tableau ci-dessous récapitule quelques un de chaque produit :

Tableau I.4.1: les symboles graphiques de quelque matériau composite

abbreviations	Symbols graphiques	Produits Géosynthétique.
GTX		Géotextile
GMB		Géo-membrane
GCE		Géo-cellule
GGR		Géo-grille

a) Caractéristiques de base des Géosynthétique :

Ces produits de la Géosynthétique existent en une très large gamme sous des plusieurs noms, marque, types et codes. Chaque un parmi eux a ses propres caractéristiques. D'une manière globale ils sont connue par leur souplesse en service et leurs adaptation aux divers situation de problème.

Les caractéristiques suivant sont les principaux :

- Légèreté
- Simplicité d'installation
- Flexibilité
- Satisfaction des conditions économiques et environnementales
- Facilité de stockage et de transport
- Volume minimale
- Garder la belle vue esthétique des structures.

b) Fonction des Géosynthétique :

Les Géosynthétique sont applicable dans plusieurs domaine de génie civil et chaque un exécute une ou plusieurs fonctions de base une qu'ils sont mis en contacte avec le matériau ou le matériel voulu (sol, roche, béton...etc.).

Les fonctions de base de ses produits sont :

- Le drainage,
- Le renfort,
- La séparation,
- La protection,

- La filtration,
- Barrière liquide.

Ils remplissent aussi d'autres fonction comme :

- L'isolation,
- La retenue,
- L'absorbassions,
- L'amortissement,
- Le criblage,
- Le renfort végétatif,
- La stabilisation extérieure.

I.5.3. 3^{ème} Génération : méthodes modérées et intelligente (nano-composite)

Historique :

Le terme nano-composite est de création récente mais le concept n'est pas nouveau pour deux raisons principales.

- Nano-composites naturels :

Une large variété de nanostructures et nano-composites existe déjà dans la nature comme les os, les toiles d'araignée ; Les manobiocomposites naturels ont une structure à l'échelle du manomètre, à l'image de celle de certains coquillages, dite de brique et mortier constituée de protéines organiques et de particules de carbonate de calcium.

- Nano-composites synthétiques historiques :

L'idée d'améliorer les propriétés des matériaux en combinant deux phases aux propriétés différentes n'est pas nouvelle, même au niveau manométrique. En 1917, le noir de carbone a été introduit dans la composition des pneumatiques dont la durée d'utilisation a été ainsi multipliée par cinq.

Les nano-composites à matrice polymère et à renforts d'argile font figures de leaders au niveau des premières applications : les processus de mise en forme des polymères sont largement maîtrisés et peu coûteux, les argiles naturelles sont faciles à extraire et sont des candidates idéales pour des nano-renforts.

Différents types de composite argile polymère :

Introduction

Depuis une vingtaine d'années, des nano-composites polymères argile connaissent un fort développement suite aux recherches menées par Olada et al [9]. Cette équipe de recherche du laboratoire Toyota a montré pour la première fois l'intérêt de disperser la montmorillonite dans le polyamide-6, en présentant des améliorations par rapport à la matrice vierge, et ce pour un faible taux d'incorporation de ces charges. Depuis les études se sont multipliées avec des matrices aussi bien thermoplastiques que thermodurcissables. L'utilisation de la montmorillonite pour valoriser ces polymères se fait de plus en plus courante

1) Type des nano-composites :

Trois types de nano-composites (figure I 12) peuvent être obtenus avec des argiles dans une matrice polymisée dépendant de la nature des constituants utilisés, y compris la matrice, les cations inorganiques et l'argile

- Micro composite

Le polymère n'est pas intercalé entre les couches de silice. Les phases sont séparées et on retrouve les propriétés des micros composites (figure I291; 1).

- Nano-composite intercalé:

Une (ou parfois plusieurs chaîne polymère est intercalée entre les couches de silice. Le résultat est une structure relativement ordonnée avec une alternance de couches polymères et inorganique (figure I.29, 2).

- Nano-composite exfolie:

Ce sont des structures délainées ou les couches de silice sont complètement et uniformément réparties dans la matrice polymère. La déamination a pour effet de maximiser les interactions polymère argile augmentant considérablement la surface de contact et créant les propriétés spécifiques (figure I.29, 3).

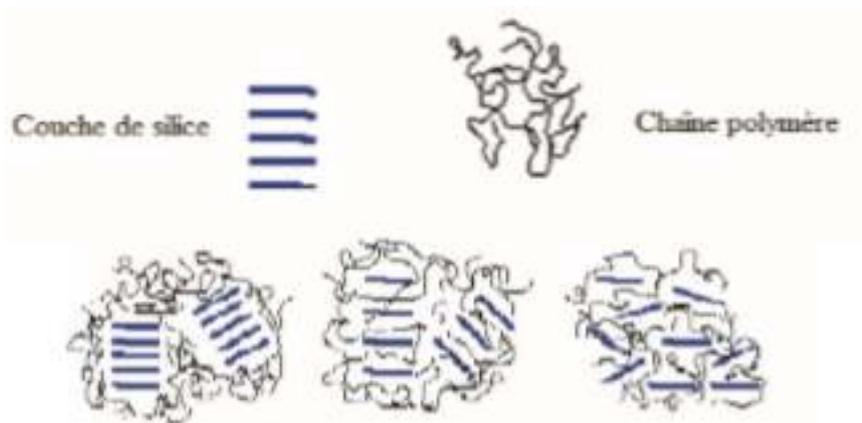


Figure I.29: micro composite (1) nano-composite intercalé (2) et nano-composite exfolier (3)

La structure des nano composites peut être déterminée par différentes méthodes d'analyse telles que la diffraction des rayons X. qui permet d'identifier la nature des structures intercalées, la microscopie électronique à transmission, qui est utilisée pour les structures exfoliées, dont les domaines sont trop réduits et dispersés pour être détectés par les rayons X, la RMN peut être également utilisée pour caractériser quantitativement la dispersion d'argile dans la matrice polymère [11]

a) Classifications des nano-composites:

1) Définition :

Le terme nano-composite est défini de nombreuses manières. Cependant, une caractéristique reste commune : la taille nanométrique du ou des renforts (Figure I.30) dans la matrice (1) ou des domaines multiphasiques qui constituent le composite (2)

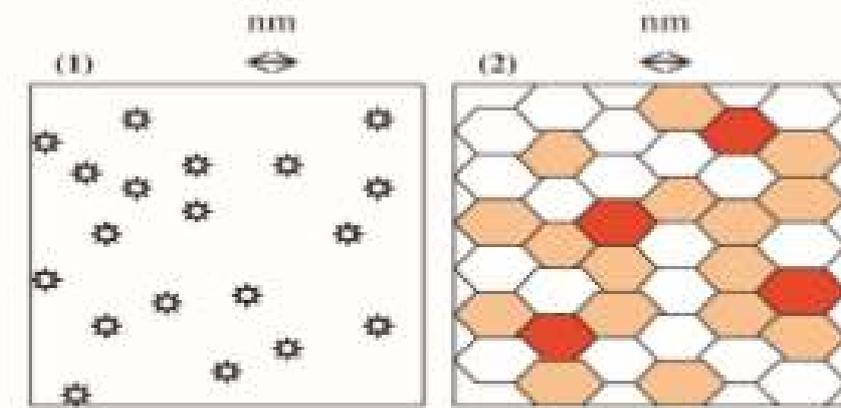


Figure I.30: Définition morphologique de nano composites:(1) Composite à renforts de dimension inférieure ou égale au nanomètre. (2) Matériaux résultant de mélange: multiphasiques, avec une répartition en tailles caractéristiques, voisine de la centaine de nanomètres, voire inférieure

2) Classification des nano composites suivant la matrice:

Classiquement les nano composites sont classés suivant la nature de la matrice et l'ordre croissant de la température d'utilisation.

- Composites à matrice polymère:

Ils sont sûrement les plus développés du fait de l'importance commerciale de ces derniers et de la maîtrise (coût et savoir-faire) de nombreux processus de fabrication. Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans un domaine de températures ne dépassant pas 200 à 300 °C.

- Composites à matrice métallique :

Un domaine de températures allant, jusqu'à 600 degrés dont certains procédés de fabrication, s'inspire de la métallurgie des poudres. Les particules de seconde phase peuvent être des oxydes, borures, carbures, nitrures

Les composites à matrice métallique encore appelés MNCs pour metal-matrix composite se sont développés grâce à la facilité et à la maîtrise des procédés de fabrication ainsi qu'à leur faible coût.

- Composites à matrice céramique:

Pour des applications à plus haute température (1000 degrés) comme les oxydes, les carbures ou les nitrures. L'utilisation des céramiques est limitée notamment par leur ténacité à la rupture, leur résistance à la fatigue et aux chocs thermiques

3) Classification suivant Les différents types de renforts ou charges :

Les renforts ont au moins une de leurs dimensions morphologiques inférieure à 100 nm et peuvent être classés en fonction de leur géométrie (Figure I.31).

- Les nanoparticules:

Les premières nanoparticules ont été utilisées il y a plus de cent ans. Les améliorations et nouvelles méthodes visent à obtenir un meilleur contrôle de la taille, de la morphologie et des propriétés de surface

- Les nanotubes et nano fibres:

Ont un diamètre inférieur à 100 nm et un rapport longueur diamètre d'au moins 100. Une avancée plus récente est venue de nanotubes de carbone avec leurs exceptionnelles propriétés mécaniques et électriques. Ils peuvent être utilisés avec une grande variété de matrices polymères (polyamide, polyester, polycarbonate polystyrène...) La dispersion des nanotubes dans le polymère

- Plaques lamelles feuilletés:

Ce sont des matériaux constitués de couches d'épaisseur de l'ordre du nanomètre et avec un rapport de forme, dans les deux autres dimensions, d'au moins 25. Parmi ce type de matériaux, les argiles sont peut-être les plus connues, elles sont naturelles donc faciles à extraire. Leur structure a été étudiée et déterminée il y a de nombreuses années [9]

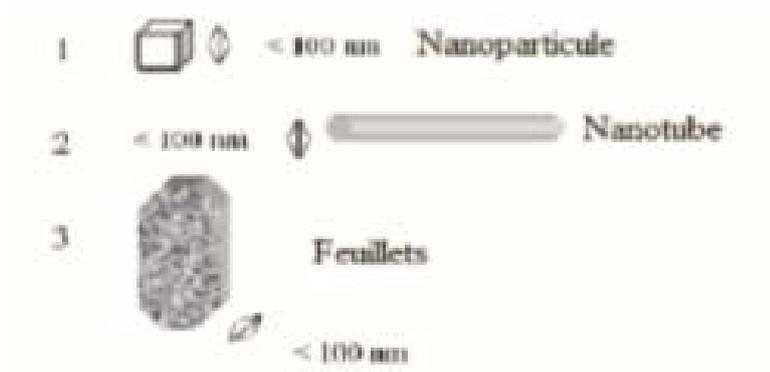


Figure I.31: Géométrie des différents types de renforts

b) Nano-composites à base d'argile dans une matrice polymère:

La fabrication de nano-composites utilisant des argiles se fait en deux étapes:

1-Modification des lamelles d'argile, pour faciliter l'intercalation de polymère dans les galeries inter foliaires de l'argile (par exemple la montmorillonite). Il faut modifier la structure hydrophile et lui donner un caractère organophile

Parmi les méthodes de modification organophile dans le cas de la montmorillonite, il y a l'échange cationique qui consiste à substituer aux cations compensation des cations porteurs de chaîne alkyle. Les cations les plus fréquemment utilisés sont les ions alkylammonium la substitution est réalisée en milieu aqueux, car le gonflement de la montmorillonite facilite l'insertion des ions alkylammonium au sein des galeries interfoliaires. Après filtration de la suspension et séchage de la montmorillonite la présence des ions alkylammonium à la surface des feuillets, des particules primaires et des agrégats confère à la montmorillonite un caractère organophile de plus, leur intercalation dans les galeries augmente la distance interfoliaires

c) Intercalation de l'argile modifiée avec le polymère:

Le polymère peut être incorporé dans l'inter-couche de l'argile soit sous forme de polymère ou de monomère qui est ensuite polymériser in situ.

Dans le cas de la montmorillonite, trois stratégies peuvent être utilisées :

1) La polymérisation in situ (figure I.32):

Le monomère liquide ou en solution migre vers la gallery > entre les couches de silicate, la réaction de polymérisation peut être déclenchée par chauffage, rayonnement ou en utilisant un initiateur intercale également entre les couches. Harrane et al. (9) Ont réussi à intercaler le polycaprolactone dans une Manganite, argile de type montmorillonite, organophile par polymérisation in situ de l's caprolactame et ont obtenu un nano-composite exfolié

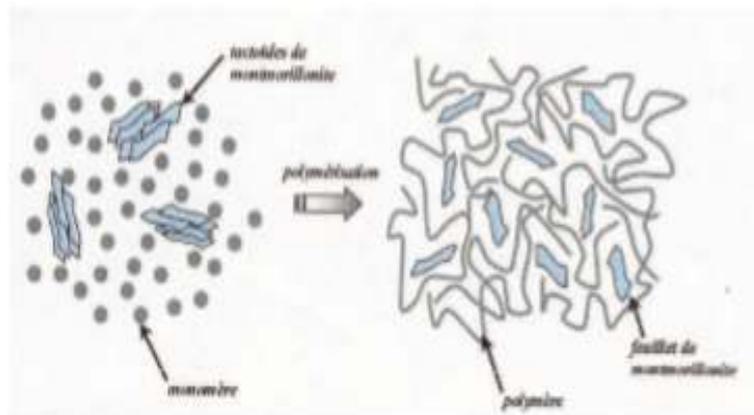


Figure I.32: Nano-composite produit par polymérisation d'un monomère in-situ.

2) utilisation de solvants polaires (figure I.33):

l'argile est mélangée à un solvant, puis on ajoute ensuite à la solution le polymère qui va s'intercaler entre les lamelles d'argile. Cette méthode est utilisée pour des polymères sans ou avec une faible polarité. L'inconvénient de cette méthode est l'utilisation de grandes quantités de solvants.

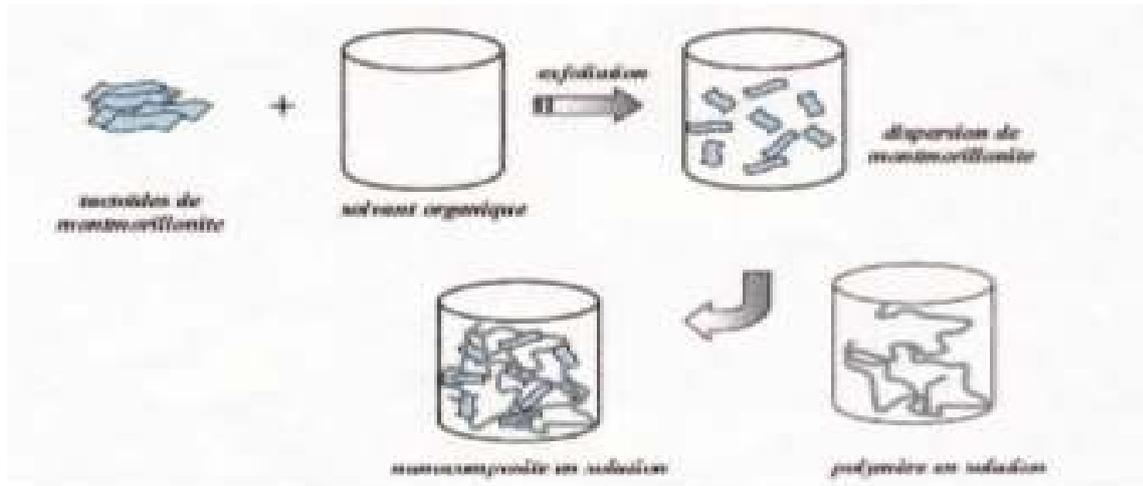


Figure I.33: Elaboration d'un nano-composite en solution

3) Intercalation par mélange en masse (figure I.34):

Le principe est de mélanger, à l'état fondu, l'argile et le polymère (thermoplastique). L'intercalation à l'état fondu est plus rapide que l'autodiffusion Shen et al. [9] ont réussi à intercaler du PEO (masse moléculaire 400.000 g-moll) à l'état fondu et à obtenir les mêmes dimensions de l'espace interfoliaire.

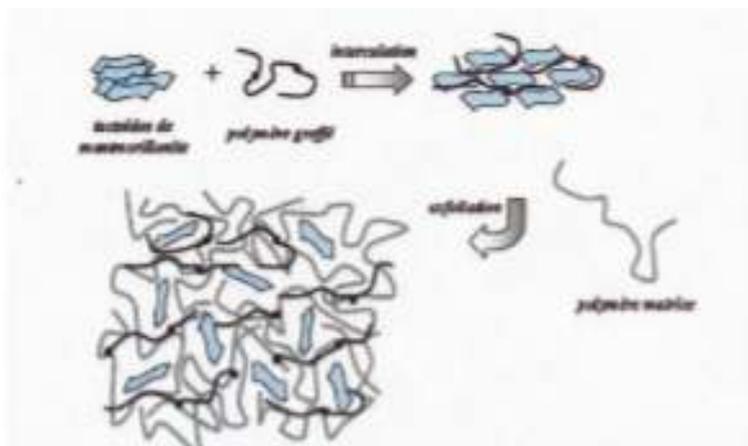


Figure I.34: Exemple d'élaboration de nano-composites en masse

d) Propriétés des nano-composites

1) Propriétés thermiques

Les principales améliorations recherchées par l'incorporation de charges inorganiques, telles que les argiles ou les oxydes, à des polymères sont la stabilité thermiques et la tenue au feu.

La stabilité thermique est pénalement évaluée par analyse thermo gravimétrique (ATC) sous atmosphère inerte ou oxydante. De manière générale, la température de dégradation des polymères est augmentée après l'incorporation de silicates lamellaires exfoliés [9], ce qui valorise ces polymères et permet leur utilisation à de plus hautes températures.

2) Propriétés barrière :

L'incorporation de charges inorganiques aux polymères est apparue prometteuse en matière de propriétés barrières aux gaz et aux fluides.

Les premières études montrant l'intérêt de réaliser des nano-composites afin d'augmenter les propriétés barrières ont été réalisées par Yano et al. [10]. L'introduction de quelque pourcent en poids de mono charges lamellaires dans une matrice polyamide a diminué fortement la perméabilité à l'oxygène, à l'hydrogène et la vapeur d'eau.

Les applications des nano-composites :

Même si les nano-composites sont très présents au niveau de la recherche, peu sont viables commercialement. Cependant, certaines applications accélèrent la transition notamment dans l'automobile, le conditionnement packaging) ou la tenue au feu. La plupart de ces applications concernent les matériaux à matrice polymère car les procédés de fabrication sont largement maîtrisés et à faible coût [16]. Ils sont aussi très utilisés dans le domaine de l'électricité et de l'électronique (composantes électriques et cartes de circuits imprimés).

Conclusion:

Vus que les matériaux composites aient une grande flexibilité en s'adaptant aux formes géométriques les plus complexes des éléments renforcés, et pour leur légèreté par rapport aux aciers, leur facilités de manutention, de transport et de mise en œuvre sur site, ainsi que leurs résistance mécanique assez importante que les autres moyens de renforcements. Ces multiples avantages, mécanique et physico-chimique permet l'utilisation des matériaux composites

Matériaux Composites

MATERIAUX COMPOSITES

II.1 Généralités :

II.1.1 Introduction:

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme. 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. Dans chacun des marchés d'application (bâtiment, automobiles, équipements industriels...) ces performances remarquables sont à l'origine de solution innovante. Les matériaux composites offrent aux industriels et aux concepteurs des possibilités nouvelles d'associer fonctions, formes et matériaux au sein de la réalisation. C'est un système de plus en plus performant.

Le poids, la plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principes de processus nouveaux de conception, d'industrialisation, qui permettent d'étendre les possibilités techniques et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids –fonction ...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement.

II.1.2 Définitions :

Dans un sens large, le mot " composite " signifie, constitué de deux ou plusieurs parties différentes. En fait l'appellation "matériau composite" ou "composite" est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce travail. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau (II.1). Et dans un sens plus précis, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort sous forme filamentaire et nécessite l'association intime d'au moins deux composants: le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison. Contrairement aux matériaux classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise en même temps, le matériau et le produit bien définis.

Actuellement, les composites à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale. Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice; ils permettent également de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés: les pigments de coloration, l'isolation thermique ou acoustique. Le développement de l'utilisation de la technique de réparation ou de renforcement par les matériaux composites s'effectue par la facilité de la mise en œuvre, la résistance mécanique et chimique élevée de ces matériaux. Ces matériaux sont couramment utilisés dans le génie civil pour le renforcement et la réparation des structures, notamment

pour augmenter la résistance des poteaux, des poutres, des dalles, des tabliers et piles de ponts.

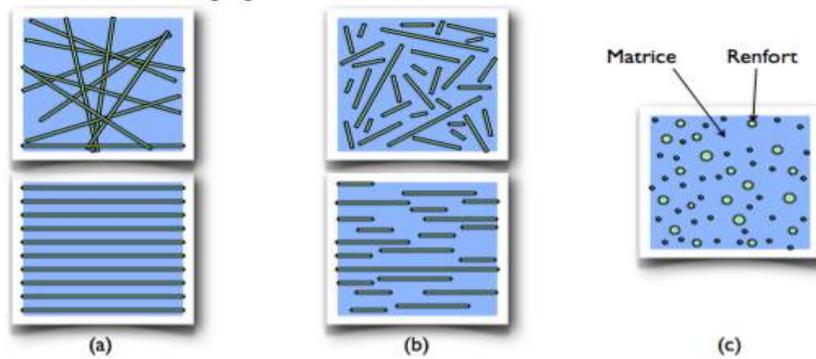


Figure II. 4 : Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.[10]

Le support du béton, au moment de la mise en œuvre des composites, doit être sec et ne présente aucun film d'eau en surface. Très peu d'études ont été réalisées pour une application en ambiance fortement humide ou immergée, même s'il existe, la plupart d'entre elles ont été réalisées en laboratoire. L'application in-situ des matériaux composite dans tels milieux n'a été réalisée que pour confinement des poteaux. L'étude sur la mise en œuvre et la durabilité des composites sur une paroi dans une ambiance fortement humide comme dans le cas de la zone de marnage en milieu marin, à notre connaissance, n'a jamais été effectuée

II.1.3 Les caractéristiques générales :

Un matériau composite consiste dans le cas général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée " la matrice ", la phase discontinue est appelée "le renfort " (*figure II.1*)

Tableau II. 5. : les différents types de composites.

<i>Type de composite</i>	<i>Constituants Type de composite</i>	<i>Domaine d'application</i>
1) <i>Composites matrice organique</i> - papier - carton -panneaux de fibres toiles enduites -matériaux d'étanchéité et pneumatiques	<i>Résine/fibre cellulosique</i> -Résine /copeaux -Résine / tissus -Elastomère -Caoutchouc/ acier	-Imprimerie -bâtiment -toitures -Automobile
2) <i>composites à matrice minérale</i> -bidon -Composite –carbone	<i>Ciment /sable /granulats</i> Carbone / fibres	-Génie civil -aviation -espace
3) <i>Composites à matrice métallique</i>	<i>Aluminium /fibres de bore</i> Aluminium /fibres de carbone	-aéro-spacial

Les propriétés des matériaux composites résultent en:

- les propriétés des matériaux constituants.
- leurs distributions géométriques.
- leurs interactions.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier:

- la nature des constituants et leurs propriétés.
- la géométrie du renfort, et sa distribution.
-
- la nature de l'interface: matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (son orientation). La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse), la concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés mécaniques du matériau composite. Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important, sa distribution uniforme assurera une homogénéité du matériau composite. Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans des zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite.

Dans le cas des matériaux composites dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'isotropie du matériau composite. Cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites : la possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par une conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées.

II.2. Les matrice :

II.2.1 Introduction :

Du fait de leurs faibles sections (des diamètres aux environs de 10 à 20 μm), les fibres ne pouvant toutefois être utilisées directement dans une application mécanique d'où l'idée de les incorporer dans une matrice polymère pour constituer un composite à fibres.

La matrice a ainsi diverses fonctions: lier les fibres entre elles, transférer les charges mécaniques aux fibres, protéger les fibres de l'environnement extérieur, ainsi ce nouveau matériau modulable, présente des caractéristiques mécaniques spécifiques assez élevées.

II.2.2 Définitions :

La matrice composée elle-même d'une résine (polyester, époxy etc.) , et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine tout en diminuant le coût de production.

D'un point de vue mécanique l'ensemble

résine-charges se comporte comme un matériau homogène et le composite est constitué de ce matériau homogène (la matrice) et d'un renfort. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

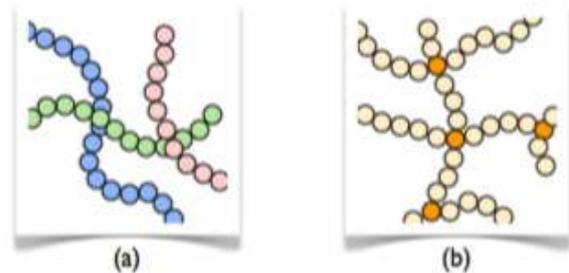


Figure II.2.2. : Structure moléculaire : (a) d'un polymère thermoplastique. (b) d'un polymère thermodurcissable.[10]

II.2.3 Les résine

II.2.3.1 Différents types de résines:

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur, les résines doivent donc être assez déformables et présentent une bonne compatibilité avec les fibres. En outre elles doivent avoir une masse volumique, et des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

Compte tenu des contraintes, les résines utilisées sont des polymères modifiés par différents adjuvant et additifs (agents de démoulage stabilisant etc.), les résines sont livrées en solution sous forme de polymères en suspension dans des solvants. Deux grandes familles de résines polymères existent: les résines thermoplastiques et les résines thermodurcissables.

Ces deux types de résines possèdent, la faculté de pouvoir être moulés ou mises en forme pour donner, soit un produit fini soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée [11].

– **Les résines thermodurcissables (TD) :**

Sont associées à des fibres longues, leur structure a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontent (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme, de façon définitive lors d'un chauffage (la transformation est donc irréversible). Ces résines conduisent à une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport important d'énergie thermique, ainsi elles possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques. Du fait de ces caractéristiques plus élevées, les résines thermodurcissables sont les plus employées actuellement dans la mise en œuvre des matériaux composites, parmi ceux qui sont les plus utilisées:

– **Les résines polyesters insaturées:**

C'est la résine la plus utilisée dans les composites de grande application. Elles passent successivement de l'état liquide visqueux initial à l'état de gel, puis à l'état de solide infusible. La réaction du durcissement dépend de la réactivité de la résine, et de la forme de l'objet fabriqué (épaisseur, etc.). Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classés en: résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont de type rigide, leurs avantages sont:

- une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevée.
- une bonne stabilité dimensionnelle. une facilité de mise en œuvre.
- un faible coût de production.
- une bonne tenue chimique.
- Une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.).

Et leurs inconvénients sont:

- Emission d'éléments polluants inflammabilité.
- une dégradation à la lumière par des rayons ultraviolets.
- une mauvaise tenue à la vapeur

– **Les époxydes:**

Ce sont les plus utilisés après les résines polyesters insaturées, du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, ces résines époxydes sont généralement utilisés sans charges ou additifs, ce sont des matrices de composites à haute performance (la construction aéronautique spatiale, missiles, etc.). Toutefois pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuissons très longues, correspondants à des températures relativement élevées de l'ordre de 100°C.

Ses avantages sont :

- une adhérence parfaite sur les fibres.
- une bonne propriété mécanique (en traction, flexion, compression, choc, et fluage, etc.),
- supérieure à celles des polyesters.
- une mise en œuvre facile, sans apport de solvant.
- une bonne tenue thermique, chimique et à la fatigue.

Ses inconvénients:

- coût élevé.
- temps de polymérisation long.
- vieillissement sous température.
- sensibilité à l'humidité et aux rayons ultra-violet.
- nécessite de prendre des précautions lors de la mise en œuvre.

- **Les résines vinylesters:**

Elles sont considérées comme des variantes de polyesters, qui se produisent à partir d'acides acryliques, elles possèdent une bonne résistance à la fatigue et un excellent comportement à la corrosion, mais demeurent combustibles.

- **Les résines phénoliques:**

Elles se caractérisent par une bonne tenue au feu sans fumée, elles restent fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à colorer et mettre en œuvre.

- **les résines polyuréthanes et polyuriques:**

Dans la fabrication des pièces composites, il est utilisé surtout des formules, dont la faible viscosité permet un bon remplissage du moule, les constituants sont livrés à l'état de pré polymères liquides.

- **Les Poly-imides :**

Ces résines sont surtout utilisées dans les composites à haute performance pour leurs stabilités à haute température (de l'ordre de 250°C), elles restent toutefois difficiles à mettre en œuvre, utilisées essentiellement dans les pièces de structure pour les réacteurs.

- **Les Bismaléimides:**

Ces des matrices très peu utilisées, elles offrent une bonne tenue à la fois au choc et à la température, mais restent difficiles à mettre en œuvre, elles sont utilisées comme support dans les cirant imprimés.

- **Les résines thermoplastiques (TP):**

La famille des résines thermoplastiques est très vaste, et peut être séparée en plastique de grande diffusion et plastique technique. Les plastiques de grande diffusion sont mises en œuvre par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extension pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc.

Les plastiques sont généralement mis en œuvre par injection. Les résines thermoplastiques possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffage, et par refroidissement successifs, donc elles peuvent être récupérées et facilement recyclées.

La structure de ces résines a la forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour mettre en forme (les chaînes se plient) et les refroidir pour les fixer.

Les principales résines thermoplastiques utilisées sont les suivants:

- polyamide: une bonne tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- poly téréphtalate éthylénique et butylique: bonne rigidité.
- polycarbonate: une bonne tenue au choc.
- polysulfures de phényle: une résistance à l'hydrolyse.
- Poly oxyméthylènes: une bonne tenue à la fatigue
- polysulfures: une bonne stabilité chimique.
- polypropylène: assez stable en température, mais combustible.

L'intérêt des résines thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois des matières premières disponibles et des procédés de fabrication, toutefois ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques, et thermomécaniques faibles.

Ces diverses résines peuvent être renforcées par des fibres courtes, cependant dans le domaine des composites ces résines ont un développement limité du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à haute température de produits solides.

II.3. Les charges et additifs :

II.3.1 Introduction:

Il est désigné sous le nom général de charge ou additif toute substance inerte, minérale, ou végétale qui incorporée à la résine, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface, de réduire le prix de revient du matériau transformé ou de faciliter la mise en œuvre du matériau composite.

À l'inverse des matrices thermoplastiques (TP), les matrices thermodurcissables (TD) contiennent toujours des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60% en terme de masse [11].

Pour une résine donnée, le choix des charges ou des additifs est déterminé en fonction des modifications recherchées, d'une manière générale ce choix devra satisfaire un certain nombre d'exigences:

- compatibilité avec la résine de base.
- uniformité de qualité et de granulométrie.
- faible action abrasive.
- bas prix de revient.

II.3.2 Les charges:

Il y a plusieurs types de charges:

a) les charges organiques:

Les charges cellulosiques utilisées comme étant des charges de résines thermodurcissables. ces avantages sont d'un coût peut élevé et d'une faible densité .

b) les charges minérales:

Sont les craies et les carbonates: Les craies sont à 99% de calcite, de la silice et d'autres minéraux, Les carbonates de calcium ou de magnésium, sont utilisés comme des charges et aussi comme des retardateurs de flamme.

c) Oxydes et hydrates métalliques:

- Poudre et micro sphères:

L'alumine, les oxydes de zinc, de magnésium et de titane sont utilisés sous forme de poudre fine. Ils permettent de diminuer le prix de revient et augmenter la densité de la matière élastique.

- Alumine et tri hydrate d'aluminium:

L'alumine apporte aux résines une meilleure résistivité électrique ainsi qu'une bonne conductivité thermique, elle diminue le coefficient de dilatation thermique, augmente la rigidité ainsi que la résistance à l'abrasion et au feu. L'hydrate d'aluminium est une charge qui du point de vue prix, est concurrentielle, elle réduit l'inflammabilité ainsi que l'émission des fumées de combustion.

- Trioxyde d'antimoine :

Il apporte aux résines une coloration blanche.

- Les céramiques: Il existe des microsphères en céramique dont la densité varie entre 0.4 et 2.4 et la dimension au-delà de 300 μm .
- Elle apporte une réduction de masse de 15 à 25% avec une amélioration de la résistance à la compression et au choc.
- Le verre:
 - poudres de verre : Une nouvelle variété de poudre de verre de granulométrie de 13 μm , son incorporation confère aux thermodurcissables une meilleure résistance à l'abrasion et à la compression, elle permet par ailleurs d'obtenir un retrait plus faible et plus homogène des pièces mouillées
 - billes de verre creuses: Sont obtenues par chauffage de billes de verre contenant un agent de gonflement, elles améliorent la résistance à la pénétration de l'eau et au vieillissement
 - microsphères de verre: l'utilisation de microsphères de verre permet de réduire de 25 à 35% la masse des pièces obtenues (destinées à l'industrie d'automobiles)
- Le carbone: Le carbone est utilisé depuis très longtemps dans l'industrie des plastiques à la fois colorant, barrière anti-ultraviolet, et anti-oxydant, il améliore la résistance à la chaleur.

II.3.3 Les Additifs:

Les additifs se trouvent en faible quantité, quelques pourcentages de moins, par contre les Charges peuvent atteindre des dizaines de pourcentage et interviennent comme étant:

- lubrifiants et agents de démoulage
 - pigments et colorants
 - agents anti-retraits
 - agents anti- ultraviolet
- a) lubrifiants et agents de démoulage:

Ces agents ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules.

b) pigments et colorants:

Les pigments sont des produits insolubles, se présentent sous forme de poudres ou de paillettes généralement, Ils sont obtenus à partir d'oxydes ou de sels métalliques.

A partir de ces pigments, il est également possible d'obtenir des pâtes colorantes, constitué de dispersions de pigment dans une pâte de manière à avoir une utilisation aisée.

Les colorants sont des composés organiques solubles dans l'eau ou dans un solvant organique, leur emploi est généralement limité, à savoir sa mauvaise tenue chimique et thermique.

Le choix de ces agents est fonction de sa compatibilité avec la résine du composite et de l'utilisation du matériau composite.

c) agents anti- retrait et agents de fluage:

Ces agents peuvent aboutir à un mauvais état de surface, un gauchissement ou des microfissurations de la pièce moulée, bien que l'incorporation des charges à la résine en limite le retrait; il est souvent nécessaire d'ajouter des produits spécifiques anti- retrait (additif appelé " low shrink") qui diminuent ou annulent le phénomène de retrait. Ces produits améliorent également l'écoulement de la matière dans certaines techniques de moulage.

Ces agents anti-retrait sont généralement des produits à base de thermoplastiques ou d'élastomères, se présentent sous forme de poudre ou de solution.

d) agents anti- ultraviolets:

Les agents anti-ultraviolets ont pour fonction de protéger les résines des rayons ultraviolets. Le principe de ces agents est d'absorber le rayonnement ultraviolet et éviter ainsi la détérioration prématurée de la résine par rupture de liaisons atomiques ou par passage à un état excité qui favorise l'oxydation.

II.4 Les fibres:

II.4.1 Introduction et définitions:

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites, et se présentent sous forme filamenteuse, ils sont caractérisés par:

- la nature de la fibre: minérale ou organique.
- L'architecture de renfort: unidirectionnelle ou bidirectionnelle.
- principaux matériaux de renfort.

Ces renforts sont constitués par plusieurs centaines ou milliers de filaments, de diamètre compris entre 5 et 15 micromètres

Il existe deux types de fibres:

- fibres courtes: quelque centimètre ou fraction de millimètre, les feutres, les mats et les fibres courtes impactées utilisées en moulage.
- fibres longues: coupées au moment de la fabrication du matériau composite, utilisée telles quelles ou bien tissés.

Ces différents types de fibres sont classés selon la nature de leurs composants:

- Des renforts à base de fibres unidirectionnelles: orientés suivant une même direction de l'espace.
- Des renforts à base de fibres bidimensionnelles: surfaces tissées (tissus) .
- Des renforts à base de fibres tridimensionnelles: volumes préformés ou non, constitués par des fibres orientées

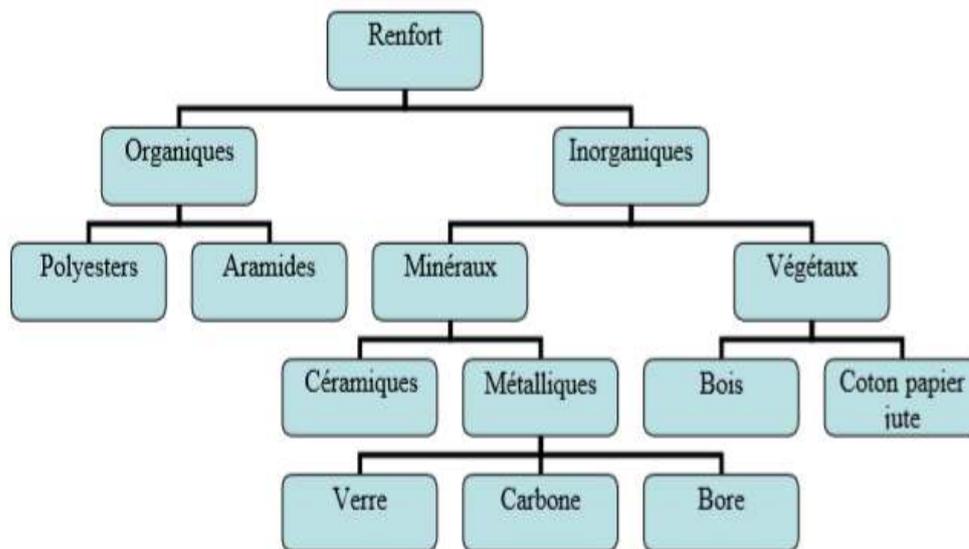


Figure II.4. : Organigramme des différentes familles de fibre [13]

II.4.2 Les fibres de carbone:

a) Elaboration des fibres de carbone:

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé "précurseur", se présentant lui mêmes sous forme de fibres orientées.

Actuellement, les fibres utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du poly-acrylonitrile (PAN), La qualité finale des fibres de carbone dépend des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique, sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation dans laquelle on retrouve la structure initiale des fibres. Les procédés actuels utilisent des mèches de filaments acryliques assemblés sans torsion (de 1000, 6000 jusqu'à 10000 filaments), et leur font subir quatre traitements successifs : une oxydation, une carbonisation, une graphitisation et un traitement de surface [13].

- L'oxydation:

Les fibres acryliques étant fusibles, la phase d'oxydation a pour but de supprimer artificiellement le pont de fusion. Cette opération est effectuée en chauffant les fibres à environ 300°C en atmosphère d'oxygène. Il se produit alors une oxydation à une réticulation des chaînes moléculaires.

- La carbonisation:

Cette deuxième phase consiste à chauffer progressivement les fibres réticulées de 300°C à 1100°C environ, en atmosphère inerte. Il y a alors une élimination de l'eau et de l'acide cyanhydrique, seuls les carbones sont conservés dans la chaîne.

Les fibres ainsi obtenues ont de bonnes caractéristiques mécaniques et peuvent être utilisées après traitement de surface. Les fibres sont alors dénommées: fibres à haute résistance (HR) ou à haute ténacité (HT).

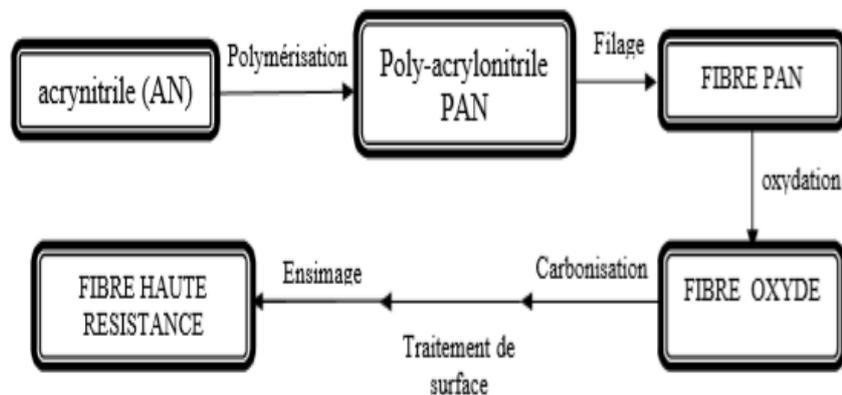


Figure II.5 : Fabrication par carbonisation des fibres hautes résistance (HR) [10]

- La graphitisation :

La phase de graphitisation est utilisée lorsqu'on souhaite obtenir des fibres à module d'Young élevé. Cette phase consiste à effectuer à la suite de la carbonisation, une pyrolyse des fibres, en atmosphère inerte, jusqu'à une température de l'ordre de 2600°C

La graphitisation provoque une réorientation des réseaux de carbone suivant l'axe des fibres, ce qui aboutit à une augmentation du module d'Young. Suivant le taux de graphitisation, on obtient des fibres à haut module (HM) ou des fibres à très haut module.

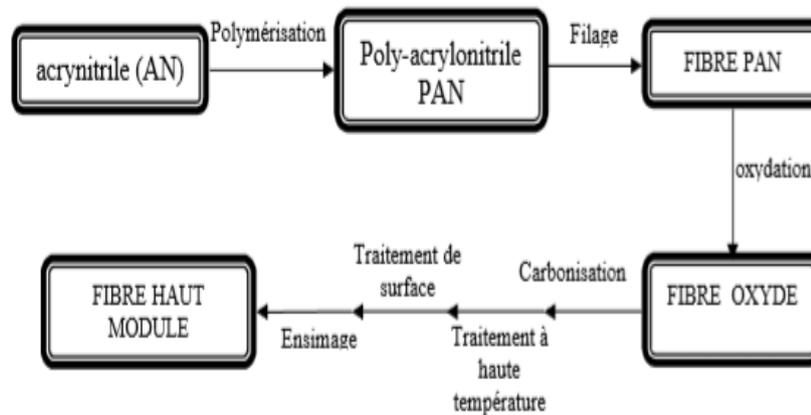


Figure II.6 : Fabrication par graphitisation de fibres hautes modules (HM) [10]

- **Le traitement de surface:**

La dernière phase consiste en un traitement de surface, par oxydation ménagée en milieu acide (nitrique ou sulfurique). Cette phase a pour objet d'accroître la rugosité des filaments ainsi que la nature des liaisons chimiques afin d'améliorer la liaison fibre-résine.

b) Les caractéristiques mécaniques des fibres de carbone:

Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques, d'autant plus que leur masse volumique est faible. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue à haute température. En effet leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C environ. Cette propriété a conduit à développer des composites : fibres de carbone/matrice de carbone, à haute tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusées, les éléments de fours, etc. Ces matériaux revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante, trouvent également des applications en atmosphère oxydante dans le domaine spatial.

c) Les produits industriels:

Le produit de base en industrie courante est le fil continu, constitué de mono fils de carbone, assemblés sans torsion. Ces stratifiés peuvent être utilisés directement pour les procédés de fabrication de composites par pultrusion ou par enroulement filamentaire. Les stratifiés peuvent être également tissés pour obtenir des rubans, des tresses, des tissus unidirectionnels ou multidirectionnels.

Conclusion et commentaires:

La liaison covalente carbone-carbone est la plus forte que nous trouvons dans la nature, puisque c'est le sixième élément chimique classé dans le tableau de Mandeliev. L'étude théorique des liaisons prévoit dans la direction parallèle aux plans cristallographiques un module de Young de 1200 KN/mm² et une résistance à la rupture de 20000 N/mm² ; ainsi

qu'une faible masse volumique, de l'ordre de 2000 Kg/m³, conduisant à des propriétés mécaniques spécifiques remarquablement élevés.[14]

Ces faits expliquent les nombreux développements et d'élaboration, permettant d'obtenir des fibres de carbone les plus parfaites possibles.

Les fibres industrielles n'atteignent toutefois pas ces valeurs numériques, théoriques, du fait des imperfections des structures cristallines. Les caractéristiques des fibres ainsi élaborées restent cependant élevées et peuvent atteindre, une performance de l'ordre de 650 KN/mm² pour le module de Young et 4000 N/mm² pour la contrainte de rupture.

II.4.3. Les fibres de verre:

a) L'élaboration des fibres de verre:

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage, et percés à leurs bases d'orifices calibrés d'environ 2mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières chauffées aux environs de 1250°C. A cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, sous forme de fibres de quelques dixièmes de millimètres. A la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir, soit des filaments continus, soit des fibres discontinues. Il existe deux procédés d'étirage : l'un mécanique et l'autre pneumatique.

- Etirage mécanique:
A la sortie de la filière, les fibres sont étirées par un procédé mécanique. Les mono filaments sont assemblés parallèlement sans torsion, sous forme de fils de base dénommés "silionnes". Ces fils de base sont les plus utilisés comme renforts de verre dans les matériaux composites.
- Etirage pneumatique:

Dans ce procédé, les fibres de verre sont étirées par un système d'aspiration à travers un tambour perforé. Les fibres obtenues, discontinues et de longueur allant de 5 à 80 mm, sont ensuite assemblées parallèlement en un ruban appelé "verranne". Les fibres verranne se distinguent des fibres silionne par un aspect pelucheux.

- Ensimage des fibres de verre:

Les filaments de verre issus de la filière ne peuvent pas être utilisés directement pour diverses raisons:

- L'absence de cohésion entre les filaments qui s'opposent à la constitution de fils.
- La sensibilité du verre à l'abrasion.
- La sensibilité à l'attaque à l'eau.
- La création de charges électrostatiques consécutive aux divers frottements.

Pour palier à ces défauts, on réalise à la sortie de la filière, une opération dite "ensimage", qui consiste à déposer à la surface des filaments de verre, un produit d'ensimage de composition

complexe. A la lumière des défauts évoqués ci-avants, les diverses fonctions essentielles de l'ensimage sont:

- Etablir une cohésion certaine entre les filaments.
- Donner une raideur assez grande aux fils.
- Protéger les filaments contre l'abrasion.
- Eviter l'apparition de charges électrostatiques.
- Faciliter l'imprégnation des filaments par la résine.
- Favoriser la liaison verre-résine dont dépendent les performances mécaniques du Composite, mais également son comportement vis-à-vis du vieillissement, de la sensibilité à l'humidité et à la corrosion, ...etc.

b) Les propriétés mécaniques:

Les grandeurs des caractéristiques mécaniques de référence, mesurées sur mono filaments, Prélevés à la sortie de la filière sont données sur le tableau B-1.

A la suite du fibrage, les filaments de verre sont soumis à divers sollicitations mécaniques (abrasion, ...etc.), chimiques (humidité,... etc) qui réduisent leurs caractéristiques mécaniques initiales.

Le tableau B-2 donne les valeurs de la contrainte à la rupture, mesurées sur fils de base ayant subi un ensimage. Les valeurs obtenues semblent indiquer une chute des caractéristiques lorsque le nombre de filaments augmente. Dans les matériaux composites, la liaison verre-résine par l'intermédiaire de l'ensimage assure une répartition assez homogène de la charge.

Les mesures, déduites de la rupture des matériaux composites unidirectionnels, conduisent aux valeurs, à la rupture des fibres sont reportées au tableau II.2.

Enfin, il est intéressant de noter que les fibres de verre, conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures assez élevées, de l'ordre de 200°C pour le verre de type E, et de 250°C pour le verre de type R. Ces fibres sont donc bien adaptées pour le renforcement des résines à tenue thermique élevée.

Tableau II.2 : Caractéristiques mécanique des fibre de verre.[14]

Caractéristique	Verre type E	Verre type R
Masse volumique (kg/m ²)	2600	2550
Module d' Young E _f (N/mm ²)	73000	86000
Contrainte la rupture f _u (N/mm ²)	3400	4400
Allongement la rupture f _u (%0)	44	52

c) Produits industriels:

Les fils de base sont labours par assemblage parallèle, sans torsion des mono filaments la sortie de la filaire, pour aboutir soit des fils continus (fils silionne), soit des fils discontinus (fils verranne), et sont caractérisés essentiellement par:

- La désignation des verres de type E ou R.

- Le type du fil : silionne ou verranne.
- Le diamètre des filaments.
- La masse linéique du fil.

Dans la gamme des fibres de verre, il existe également des complexes appels: mts-tissus mis au point pour répondre à des exigences particulières. Leur principale application est le renforcement des piques de formes planes ou grands rayons de courbure et plus particulièrement de grandes dimensions. Dans de telles piques sollicitées en flexion, le tissu est dispos dans la zone sollicitée en traction, et le mt dans la zone en compression, compte tenu de leurs bonnes adéquations respectives ces deux types de sollicitations.

II.4.4 Les fibres d'aramides:

a) Elaboration des fibres d'aramides:

Les fibres aramides caractéristiques mécaniques lèves sont généralement connues sous le nom de "Kevlar", nom commercial de la fibre mise au point par Dupont de Nemours. L'élaboration des fibres d'aramide est effectuée basse température (-10C), puis par filage en solution. Les fibres sont ensuite tirées et traitées thermiquement afin d'augmenter leur module d'élasticité.

b) Les caractéristiques et utilisation industrielle des fibres d'aramides:

Les caractéristiques mécaniques des fibres aramides sont reportées dans le tableau II.3. Néanmoins, leur utilisation est limitée par diverses faiblesses des matériaux composites fibres aramides:

- Résistance faible la compression, la flexion, au flambement.
- Sensibilité au cisaillement.

Ces faiblesses sont généralement attribuées une mauvaise adhérence fibre-matrice. Compte tenu de leur légèreté et de leur bonne résistance au choc, l'impact et l'abrasion, les fibres aramides sont utilisées pour la fabrication de blindages et de produit de friction et de joints.

Tableau II.4: les propriétés mécanique des fibres d'aramides

Caractéristique		Verre type E	Verre type R
Masse volumique	(kg/m ²)	1440	1450
Module d' Young Ef	(N/mm ²)	60000	120000
Contrainte la rupture fu	(N/mm ²)	3000	3000

Allongement la rupture fu (%)	36	19
-------------------------------	----	----

II.4.5. Les fibres de bore:

Un filament de tungstène (= 12 m) sert de catalyseur la réaction de chlorure de bore et d'hydrogène 1200C. Les fibres de bore obtenue ont un diamètre d'environ 100 Um (la vitesse de croissance est de 1 u/s Fibres de haut module et insensibles l'oxydation hautes températures, elles sont obtenues par dpt en phase gazeuse du un substrat en tungstène.

II.4.6. Les fibres de silice (ou de quartz)

Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.

II.4.7 Les fibres de polyéthylène de haut module :

Elles présentent une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Pour des structures peu sollicitées, on peut encore utiliser des fibres synthétiques courantes de polyamide ou polyester.

II.4.8. Les Caractéristiques des fibres et renforts

Tableau II.5 : Les Caractéristiques des fibres et renforts:

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (Kg)	Module d'élasticité longitudinal (N/mm ²)	Module de cisaillement (N/mm ²)	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture(traction) (N/mm ²)	Allongement à la rupture(%)	Coefficient de dilatation thermique
	D	M _v	E	G	K	G	A	u
	16	2600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	0.5° 10
	10	2500	86 000		0.2	3 200	4	0.3° 10
	6.5	1800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	0.08° 10
	7	1750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	0.02° 10
	12	1450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	0.2° 10
	100	2600	400 000			3 400	0.8	0.4° 10
	10	2600	200 000			3 000		
		960	100 000			3 000		

II.5 Classification des matériaux composites:

II.5.1. Classification suivant la forme des constituants :

Introduction:

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants. En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

Les composites à fibres :

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous une forme fibreuse.

Les fibres utilisées se présentent, sous un aspect de fibres continues, sinon d'un aspect discontinue : ces fibres sont soit coupées, soit courtes.

L'arrangement des fibres, et leurs orientations dans un plan, permet de moduler les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes.

Les composites à particules :

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de dimensions privilégiées. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait ...etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour diminuer le coût de revient du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice – particules dépend des propriétés souhaitées par exemple, des incursions de plomb dans des alliages de cuivre, augmentera leur facilité d'usinage. Des particules de métaux tels que le tungstène, le chrome incorporé dans les métaux ductile, augmentera leurs propriétés à température élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante [8].

II.5.2. Classification suivant la nature des constituants :

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant les composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale. Divers renforts sont associés à ces matrices, seuls certains couples d'association ont actuellement un usage industriel:

Composites à matrice organique avec :

- fibres minérales : verre, carbone.
- fibres organiques : kevlar, polyamide.
- fibres métalliques : bore, aluminium.

Composites à matrice métallique avec :

- fibres minérales : carbone.
- fibres métallique : bore.
- fibres métallo –minérales.
- Fibres de bore revêtues de carbure de silicium.

Composites à matrice minérale avec :

- fibres métalliques.
- particules métalliques.
- particules minérales.

Conclusions: Les matériaux composites présentent des avantages tels que:

- résistance mécanique : pour une même section d'acier, la résistance des fibres de composites est plus élevée ;
- poids : la densité des matériaux composites représente 20% de celle des platines d'acier ; pour une même résistance ultime le poids de PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) est inférieure de 10% au poids des platines d'aciers.

- maniabilité : les bandes des matériaux composites présentent une large flexibilité qui facilite la mise en œuvre et son application dans les zones confinées.
- Vu la difficulté d'assemblage et de transport sur site des platines d'acier, les PRFC sont beaucoup plus concluants que ces derniers.
- facilité de préparation de surfaces
- la non nécessité d'une fixation mécanique : comparativement aux platines d'acier ; cependant le collage des matériaux composites doit être minutieux.
- la durabilité du système de renfort : la bonne tenue des matériaux composites à la corrosion par rapport à celle des platines d'acier, qui peuvent être contaminés par le chlorure ou leur zones de fixation seront fissurées.
- tenue au feu : la conductivité thermique des matériaux composites est inférieure à celle des platines d'acier. La dégradation due au feu des matériaux composites est lente à celle des platines d'acier.
- réduction du risque « gel- dégel » : la mise en œuvre du bandage des matériaux composites favorise une bonne étanchéité vis-à-vis de la formation du phénomène « gel-dégel »
- la maintenance et entretien : le système de renforcement de matériaux composites n'exige pas un entretien, par contre le renforcement par les platines d'acier demande une maintenance périodique continue.
- réduction du temps d'exécution et mise en œuvre : la préparation, le transport et la mise en œuvre des platines d'acier prend un temps considérable par rapport à l'application des matériaux composites.
- l'aptitude de précontrainte dans les matériaux composites : un nouveau champ des bandes plates de précontrainte des composites est appliquée afin de compenser la perte de tension dans l'élément structurel et réduire ainsi les fissures.
- Le choix est porté sur les fibre de carbone en comparaison avec les fibres de verre et les fibres d'aramide (tableau II.6), de MEIR.

Tableau II.6 : comparaison qualitative entre fibres.[13]

Critères	Fibres de carbone	Fibres d'aramide	Fibres de verre
Résistance à la traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à la compression	Très bonne	Inadéquate	Bonne
Module d'élasticité	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à long terme	Très bon	Bon	Adéquat
Comportement à la fatigue	Excellent	Bon	Adéquat
Densité	Bonne	Bon	Adéquat

Résistance alcaline	Très bonne	Excellent	Inadéquate
Prix	Adéquat	Adéquat	Très bon

II.6. Différents méthodes de mise en œuvre des matériaux composites

Les composites peuvent être appliqués sur des éléments de structures de trois façons différents:

- Mise en œuvre par collage des lamelles ;
- Mise en œuvre par collage des tissus ;
- Mise en œuvre par insertion des barres en composites.

II.6.1. Mise en œuvre par collage des lamelles :

La majorité de l'application des matériaux composites se fait par un collage des lamelles (plats putrides) sur la surface du béton en utilisant un adhésif. La plupart de ces lamelles sont fabriquées à base de fibres de carbone. Les lamelles peuvent être utilisées pour le renforcement d'une structure en béton en flexion mais également en cisaillement.

L'application se fait par un double encollage en appliquant une couche de colle sur le support et une couche sur la lamelle. Avant d'appliquer la lamelle, il faut s'assurer que les irrégularités de la surface du béton sont enlevées. La surface de béton doit également être rendue rugueuse, par exemple par sablage, et nettoyage, afin de fournir une surface de bonne adhérence. Après l'application de la colle, la lamelle peut être appliquée à la surface du béton. L'air piégé entre le béton et la lamelle doit être enlevé, par exemple, en appliquant une pression sur la lamelle à la main ou en utilisant un rouleau. La polymérisation de la plupart des adhésifs, notamment les colles époxydes, a lieu à température ambiante. Il est cependant possible d'accélérer le processus de durcissement par l'application de chaleur. Les lamelles rigides ne pouvant pas épouser les formes du support, cette technique est plutôt adaptée à des surfaces planes ou ayant de grands rayons de courbure.[12]

II.6.2. Mise en œuvre par collage des tissus :

Le deuxième système de renforcement est un système avec une stratification in-situ des tissus. Les tissus sont généralement constitués de plusieurs couches de fibres. Les tissus peuvent être unidirectionnels ou stratifiés (directions de fibres multiples).

Deux processus différents peuvent être utilisés pour mettre en place un tissu sur des surfaces en béton :

- Le tissu sec peut être appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture qui est destinée au collage, à l'imprégnation des tissus et à la protection finale. Ce processus est connu en anglais sous le terme « wetlayup system ».

- Le tissu peut être pré-imprégné avec la résine dans une machine adaptée, puis déposé avant polymérisation sur la surface de béton. Ce processus est connu en anglais sous le terme « pre-preg system »,

Un avantage du renforcement par tissu est qu'il peut être appliqué sur des structures de différentes formes et que la surface n'a pas besoin d'être plane.

II.6.3. Mise en œuvre par insertion des barres en composite :

La réparation ou renforcement en utilisant des barres en composites montées près de la surface, connues en anglais comme NSM FRP (NearSurface MountedFiberReinforcedPolymer), est une des techniques les plus récentes de renforcement des structures en béton. La technique consiste à insérer des barres en composite ou des bandes en composite dans une rainure d'un béton pré-remplie avec un adhésif (Figure II.7).

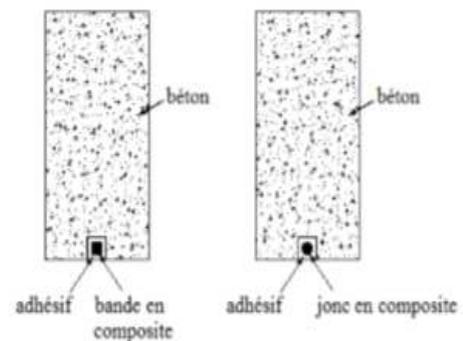


Figure II.7 : Différents systèmes de NSM

Comme pour la réparation ou renforcement par un collage des matériaux composites, cette technique a été initialement développée pour les barres d'armatures en acier, mais a été remplacée par des composites, en raison de leur non-corrosivité, d'un faible poids et d'une résistance élevée. Un avantage de l'application de NSM est que les barres sont protégées par l'enrobage du béton et sont donc mieux protégées contre les agressions environnementales et au vandalisme. De plus, comparé au renforcement par collage des composites, le NSM a une plus grande surface d'adhérence et a donc la possibilité d'une capacité portante plus élevée. En raison de la nécessité de faire une rainure, cette technique nécessite plus de travaux de préparation et donc coûte plus chère par rapport au collage des composites. En outre, la structure existante doit avoir un enrobage suffisamment épais pour la réalisation d'une rainure dans le béton [12].

II.7. Application des matériaux composites dans le génie civil :

Toutes les parties d'un ouvrage : des poteaux, des poutres, des dalles, des tabliers, des piles de ponts, etc., peuvent être renforcées par collage de matériaux composites. Le recours à un renforcement structurel peut être nécessaire pour plusieurs raisons :

- La dégradation du béton peut entraîner une diminution progressive de la capacité structurelle des ouvrages. Le renforcement de l'élément endommagé par collage de matériaux composites peut permettre de restaurer, voire d'améliorer les capacités structurelles initiales, tout en bloquant la propagation des fissures.
- la capacité structurelle définie à la conception de l'ouvrage peut devenir insuffisante en cas d'évolution de l'affectation de l'ouvrage. Dans le cas des ponts routiers, les travaux de modification de l'ouvrage (par exemple son élargissement en vue d'augmenter le nombre de voies) visent souvent à augmenter sa capacité pour assurer

un trafic routier plus important. Le renforcement de certains éléments de structure peut alors permettre à l'ouvrage de maintenir un niveau de sécurité suffisante.

- le renforcement préventif des infrastructures peut être indiqué dans les zones à fort risque sismique (particulièrement pour les piles de ponts). Le confinement augmente significativement la résistance et la ductilité de la colonne.

Les composites permettent d'augmenter la résistance en flexion, à l'effort tranchant, et aussi aux efforts sismiques. De manière générale, il existe trois applications principales en fonction du type de renforcement recherché:

- les poutres et dalles peuvent être renforcées à la flexion en collant des renforts composites unidirectionnels sur la face en traction, les fibres du composite étant orientées selon l'axe longitudinal de l'élément de structure, suivant la direction des contraintes principales de traction. .
- les poutres et dalles peuvent aussi être renforcés à l'effort tranchant par collage des composites sur les faces latérales, les fibres étant orientées perpendiculairement par rapport à l'axe longitudinal de la structure.
- les colonnes peuvent être renforcées aux efforts axiaux par confinement des composites autour de ces éléments.

II.8. Paramètres d'influence sur la durabilité des matériaux composites :

La durabilité des systèmes de renforcement par matériaux composites a été définie par Karbhari et al. [20] comme l'aptitude de ces matériaux à résister à la fissuration, l'oxydation, l'attaque chimique, la déamination, et l'usure pendant une période donnée, dans les conditions de charge appropriées et conditions environnementales spécifiées. De manière générale, les paramètres qui peuvent influencer la durabilité des matériaux composites peuvent être classés en deux catégories : paramètres environnementaux et paramètres liés aux matériaux

II.8.1. Paramètres environnementaux

Température et humidité

Le point le plus important concerne la température est la température de transition vitreuse T_g . Les propriétés mécaniques diminuent à l'approche de ce seuil de température. Pour éviter une rupture issue de l'adoucissement de l'adhésif ou de la résine, la température maximale de service doit être inférieure à T_g . L'exposition à l'humidité peut avoir des effets néfastes sur les matériaux composites. L'humidité absorbée dans les composites peut induire la plastification (par hydrolyse), réduire la température de transition vitreuse (T_g), et provoquer une relaxation dans la matrice (adoucissement de la résine). La quantité d'eau absorbée dépend du type de résine et de la température de l'eau. L'absorption maximale d'eau par une résine époxy est environ de 3% en poids. L'exposition des composites à l'humidité ou aux cycles séchage-mouillage a un effet significatif sur les propriétés mécaniques des assemblages collés. [11].

L'influence de la combinaison de la température et de l'humidité sur les caractéristiques mécaniques d'une résine époxy polymérisée à froid est illustrée sur la Figure II.8.1.

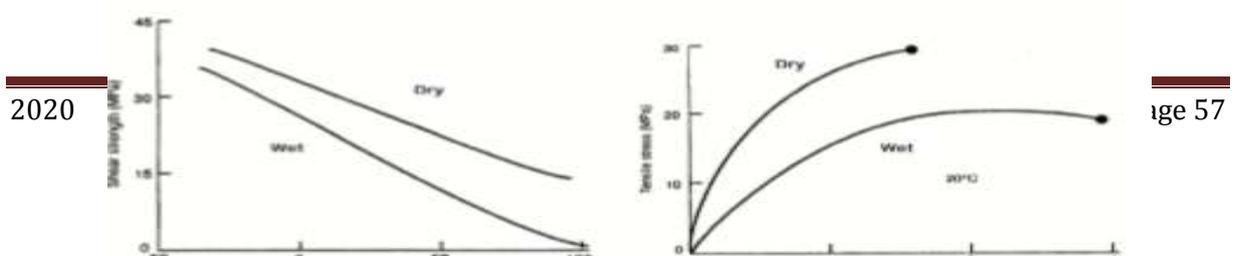


Figure II.8. : Influence de la température et de l'humidité sur les caractéristiques mécaniques d'une résine époxy [11]

Ultraviolet :

Les ultraviolets émis par le soleil peuvent produire un changement du couleur du composite. Ce changement de couleur ou décoloration qui est dû à l'influence des rayons ultraviolets sur la résine de la matrice, n'implique aucune dégradation structurale ou physique [20]. Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites sont très légèrement influencées par les rayons ultraviolets. Pourtant, une exposition à long terme des composites au rayonnement UV provoque des défauts de surface et les fissures, ce qui pourrait faciliter la pénétration de l'eau et les impuretés de surface dans le composite. Il pourrait finalement provoquer la perte de propriétés mécaniques dans le système composite [11].

II.8.2. Paramètres liés aux matériaux :

L'efficacité de la réparation et renforcement par les matériaux composites dépend de la durabilité de l'adhérence entre les composites et le béton [11]. Selon Munger et Vincent [11], la qualité de l'adhésion d'un collage et sa durée de vie seraient proportionnelles à la profondeur de pénétration de la résine, qui dépend à la fois des propriétés du substrat et de la résine.

La rugosité et la porosité du béton :

La rugosité et la porosité du béton contribuent à l'augmentation de l'aire de contact et favorisent l'ancrage mécanique. Un traitement de la surface est donc nécessaire car il permet d'une part d'éliminer la couche de très faible cohésion ainsi que toute présence d'huile ou autre agent polluant, et d'autre part d'obtenir une surface de rugosité souhaitée. Toutanji et Ortiz ont étudié l'influence du traitement de surface du substrat sur l'adhésion d'un composite sur un support en béton. Les traitements de surface du support (sablage et eau sous pression) permettent d'optimiser la rugosité de surface. Pourtant, un traitement trop agressif peut entraîner une rugosité trop importante, ce qui est néfaste à la bonne tenue du revêtement. De l'air peut rester piégé et provoquer par la suite une décohésion du revêtement. Il existe donc une rugosité optimale du support (Figure II.9).

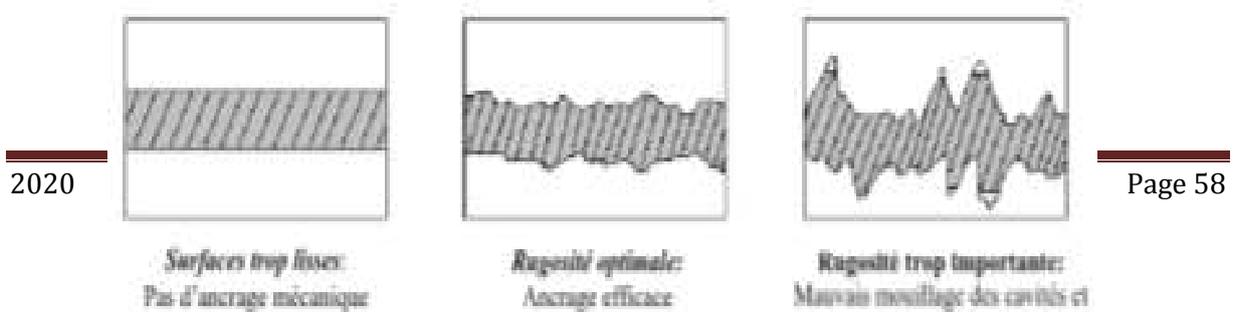


Figure II.9 : Influence de la rugosité de substrats sur l'ancrage mécanique [14]

L'eau présente dans le substrat du béton :

L'eau présente dans le substrat du béton a une influence néfaste sur la pénétration de la résine. Pour que la pénétration de la résine soit optimale, les pores du béton doivent être vides, en particulier d'eau. Le support peut être humide mais ne doit pas être saturé en eau. Sasse et Fiebrich [12] ont montré que le mécanisme de pénétration de la résine dans le béton est quasiment parfait sur substrat sec alors que des délaminages et des fissures sont visibles sur substrat humide. Paillère et al ont par ailleurs trouvé que l'adhérence d'un polymère sur un support béton humide serait liée à l'absorption plus ou moins élevée de l'eau présente en surface du substrat. Selon eux, les résines chargées adhéraient mieux que les résines pures puisque, par exemple, les fillers calcaires sont hydrophiles. Ils peuvent absorber l'eau en surface du béton et provoquer un assèchement superficiel de la surface. Wu et al. ont étudié l'influence de l'eau sur la réaction de polymérisation des résines époxydes. Ils ont prouvé que la présence d'eau distillée en faible quantité accélère la réaction de polymérisation et améliore les propriétés mécaniques des résines. Ils ont également constaté qu'un excès d'eau pendant la réticulation entraîne, après évaporation de celle-ci, l'apparition d'un trop grand volume libre dans la résine ayant pour conséquence de faciliter l'absorption d'eau au cours du vieillissement.

La viscosité de la résine :

La viscosité de la résine est le paramètre essentiel gouvernant le flux capillaire à l'intérieure des porosités du béton. Plus la viscosité est faible, plus la résine pourra pénétrer dans les pores ouverts du béton et la profondeur sera plus importante.

Backelandt [13] a développé une méthodologie permettant d'étudier la pénétration d'une résine époxyde dans une pâte de ciment durcie. Trois techniques différentes ont été utilisées:

- La microscopie optique sous éclairage ultraviolet pour évaluer la profondeur de pénétration d'adhésif dans lequel un pigment fluorescent a été introduit.
- La zone de pénétration a également été observée en microscopie électronique à balayage, en mode de détection des électrons secondaires.

- La technique microsonde électronique a permis d'obtenir le profil de concentration de l'élément carbone (relative au polymère) à l'intérieur de la pâte de ciment, et de déterminer ainsi la profondeur de pénétration.

Les trois méthodes proposées confirment la présence d'une zone de transition et des résultats de la profondeur de pénétration obtenus sont concordants, comme le montre la Figure II.10.

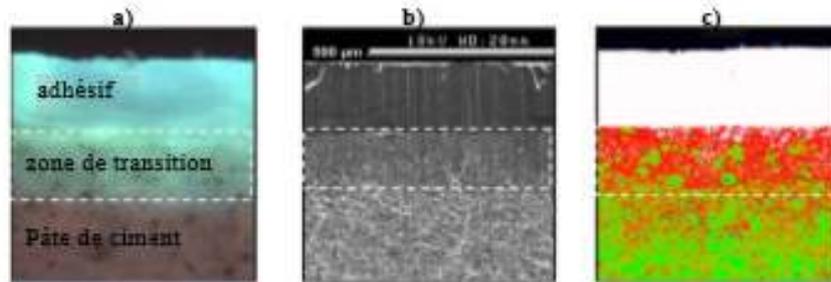


Figure II.10: Comparaison des différents modes [13]

II.9. les avantages du renfort par matériaux composites :

Le renfort au moyen de matériaux composites offre :

- une légèreté 5 fois plus que l'acier.
- une résistance 10 fois plus optimale que les platines.
- une grande flexibilité avec une faible épaisseur.
- une facilité de transport
- un poids de l'ordre de 800gr le mètre carré (épaisseur d'environ 1mm)
- une mise en place et un découpage à la forme désirée
- une mise en œuvre aisée
- adaptation aux supports
- Non sensibilité à la corrosion et d'autres attaques chimiques
- Meilleure résistance au feu et à la fatigue.

Comme méthode de renforcement et de réhabilitation des structures en béton armé, l'application de tissus ou lamelles en polymère renforcé en fibre de carbone (PRFC) est une alternative intéressante aux méthodes de réparation conventionnelle. C'est pour cette raison que Le choix de renforcement à l'aide de matériaux composites (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) de l'élément à renforcer dont a fait l'objet de cette étude est jugé favorable.

Conclusion :

Le développement de l'utilisation de la technique de réparation ou de renforcement par les matériaux composites s'effectue par la facilité de la mise en œuvre, la résistance mécanique et chimique élevée de ces matériaux. Ces matériaux sont couramment utilisés dans le génie civil pour le renforcement et la réparation des structures, notamment pour augmenter la résistance des poteaux, des poutres, des dalles, des tabliers et piles de ponts. Le support du béton, au moment de la mise en œuvre des composites, doit être sec et ne présente aucun film d'eau en surface. Très peu d'études ont été réalisées pour une application en ambiance fortement humide ou immergée, même s'il existe, la plupart d'entre elles ont été réalisées en laboratoire.

L'application in-situ des matériaux composite dans tels milieux n'a été réalisée que pour confinement des poteaux. L'étude sur la mise en œuvre et la durabilité des composites sur une paroi dans une ambiance fortement humide comme dans le cas de la zone de marnage en milieu marin, à notre connaissance, n'a jamais été effectuée.

Analyse numérique

ANALYSE NUMERIQUE**III.1. Introduction****III.1.1 Méthode des éléments finis**

Dans le domaine de géotechniques, les travaux expérimentaux sont basés sur les modèles réduits par modélisation physique à l'aide de la méthode des éléments finis. Cette modélisation est devenue aujourd'hui une pratique courante de calcul assisté par ordinateur dans ce domaine. Elle permet de résoudre plusieurs problèmes complexes dont aucune autre méthode ne peut le faire. [14]

III.1.2. Définition de la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est une méthode numérique de résolution approchée des équations différentielles décrivant les phénomènes physiques de l'ingénierie. Elle connaît, depuis 1970 environ [15], la méthode des éléments finis étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations différentielles. Le composant à analyser est subdivisé en un grand nombre de petits éléments finis avec une géométrie simple, qui peuvent être calculés avec les équations initiales connues. C'est de cette subdivision que le nom de cette méthode est retiré.

III.1.3. Avantage de la méthode des éléments finis :

- Son modèle analytique commun offre la possibilité de représenter un grand nombre de formes de structure. [15]
- L'aptitude de définir des maillages très irréguliers.
- Accepte l'analyse même en cas des lois complexes de propriété intrinsèque

III.1.4. Choix du type d'élément et discrétisation :

La première étape consiste à choisir le type d'élément le plus adapté au problème donné. Soit unidimensionnel, bidimensionnel ou tridimensionnel et chaque type correspond à une catégorie de problème particulière. Le deuxième travail sur le choix du maillage, plus qu'il est fin il est précis, pour cette raison les maillages sont plus fins dans les régions où les contraintes varient rapidement que dans les régions où elles varient graduellement.

III.1.5. Formulation des éléments finis:

La méthode des éléments finis représente l'extension de la méthode de rigidité pour les portiques à l'étude bidimensionnelle et tridimensionnelle des structures continues (exemple : plaque, coque ... etc.). Dans la méthode des éléments finis, la structure continue est remplacée par une structure idéalisée équivalente composée d'un ensemble d'éléments appelés «élément fini», qui est censé relier les uns aux autres en un nombre fini de points appelés nœuds. On définit de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque «élément fini», qui est censé relier les uns aux autres en un nombre fini de points appelés nœuds.

On définit de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque «élément fini» qui est une approximation du problème. Cette approximation de la fonction choisie par

un élément appelé une « interpolation » qui est exprimée en fonction des déplacements aux nœuds. Il est possible, par l'utilisation des théorèmes de l'énergie, de déterminer la matrice de rigidité qui relie les forces nodales avec les déplacements nodaux d'un « élément fini ». La matrice de rigidité de l'assemblage des éléments est obtenue de la même manière que le cas des portiques (Méthode des rigidités). Si les conditions d'équilibre sont appliquées, chaque nœud de la structure modélisée, on obtient un système d'équations simultanées résoudre.

III.1.6. Procédure d'analyse par éléments finis

La procédure comporte les étapes suivantes :

- L'idéalisation et la discrétisation de la structure en éléments finis par un maillage constitue de lignes ou de surfaces imaginaires. Les éléments sont supposés reliés en un nombre fini de points nodaux situés sur leurs frontières.
- Les déplacements de ces points nodaux seront les inconnues de base du problème. Il est apparent que la méthode des éléments finis est applicable pour les structures des matériaux de propriétés hétérogènes ou de formes géométriques compliqués et irrégulières (bords courbes, trous,...).
- On choisit une fonction de déplacement permettant de définir de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque « élément fini » en fonction des déplacements de ces nœuds. On se basant sur cette fonction de déplacement, nous déduisons- la matrice de rigidité de l'élément qui lie les forces nodales avec les déplacements nodaux et la matrice masse en utilisant le principe des travaux virtuels ou le principe de l'énergie potentielle totale minimale.
- L'analyse de la structure idéalisée de l'assemblage des éléments. Cette analyse procède de la manière classique qui a été décrite par la méthode des rigidités.

En fin la solution de ces équations nous permet d'évaluer les déplacements et les efforts internes dans la structure (contrainte, déformation).

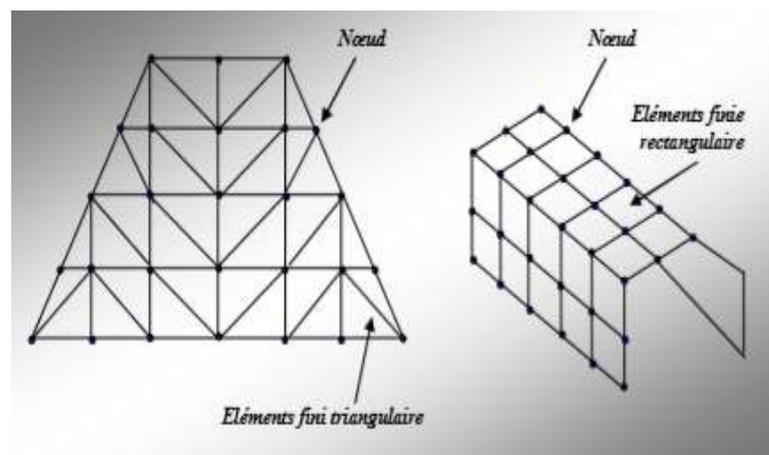


Figure III-1: Modélisations de structures par éléments finis [4]

III.1.7. L'enchaînement du programme d'éléments finis :

L'organigramme suivant résume les parties de base du programme numérique pour la résolution complète d'un problème par la méthode des éléments finis

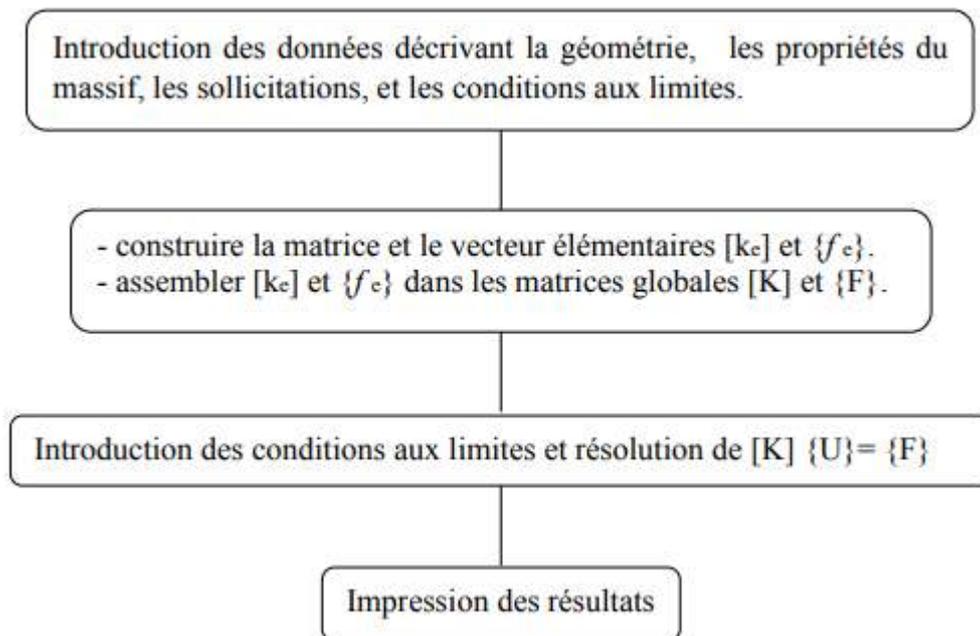


Figure III-2: Organigramme des étapes d'un programme en éléments finis [15]

III.2. Présentation du logiciel ANSYS et principe du choix :

III.2.1. Introduction

Le logiciel ANSYS est un programme de simulation basé sur la méthode des éléments finis. Le logiciel ANSYS a été développé afin de répondre à différents problèmes : problèmes de contact et d'impact entre des solides élastiques et/ou hyper élastiques, dynamique du système multi corps.

III.2.2. Principaux produits et capacités

ANSYS Structural :

Permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont l'analyse statique, l'analyse modale, l'analyse harmonique (réponse forcée), l'analyse temporelle et la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations);

ANSYS Mechanical :

Ce produit dispose des mêmes capacités que ANSYS structural ;

ANSYS CFX et Fluent : Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides ;

ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA :

Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations ;

- ANSYS Electromagnétiques : Permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques ;
- ANSYS Multiphasiques : Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

III.2.3. Plats formes ou environnements

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- ANSYS Classique : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À

Partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en se basant sur les commandes disponibles dans le code ANSYS.

- ANSYS Workbench : Cette plate forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièce) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS. [6]

III.2.4. Modélisation par ANSYS:

ANSYS, est l'un des plus grands développeurs et fournisseur de logiciels de simulation numérique au monde. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis [7], afin de résoudre des modèles discrétisés. Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques. Ses principales capacités sont :

- 1) l'analyse statique.
- 2) l'analyse modale
- 3) l'analyse harmonique (réponse forcée)
- 4) l'analyse temporelle ou transitoire
- 5) la gestion de différentes situations non linéaires (contacts, plasticité des matériaux, grands déplacements ou grandes déformations
- 6) la simulation en matière de mécanique des fluides
- 7) permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

Conclusion :

A fin de modéliser un ouvrage, une méthode et un outil de calcul est indispensable. Pour cela on a choisie la méthode des éléments finis qui permet l'analyse numérique des problèmes de

structures, des problèmes physiques et mécanique régis par des équations différentielles. Et le logiciel ansys16.0 composé de de trois modules fondamentaux : préprocesseur, calcul et post-processeur pour notre cas d'étude.

Cas d'étude

CAS D'ETUDE

IV-1. Introduction :

Dans cette thèse on tient à étudier le comportement d'un mur de quai en deux différent cas de renforcement. le premier par la méthode classique, et le deuxième sera dans le cas de renforcement par matériaux composite.

La modélisation des éléments est exécutée par la méthode des éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS16.0. Avec la définition de chaque paramètre de chaque élément du model, passant par la géométrie et la propriété de chaque matériaux. Ensuite le maillage et les condition aux limites et a la fin un analyse approprié sera déclenché.

IV-2. Description du cas d'étude :

Le mur de quai concerné dans ce mémoire se situ a la wilaya de Tipaza près du port (a gauche du port). C'est un quai qui est en cour de réalisation à fin d'empêchai la remonté des eaux jusqu'à la falaise qui est a son tour stabilisé par l'utilisation des nappes géotextile. Distant de 66 km d'Alger. Sa localisation est classée dans la zones III caractérisé par un mouvement sismique élevé. Ce mur est un mur poids repose sur une couche de sable.



Figure IV.2 .a : Coupe perpendiculaire a la falaise



Figure IV.2 .b : Situation du projet.

IV-3. Géométrie de l'ouvrage :

La structure du mur de quai a une très simple géométrie, dont les dimensions sont :

- Longueur totale de 50m ;
- Largeur de 4m ;
- Hauteur de 2m ;
- Et une épaisseur de 1m.

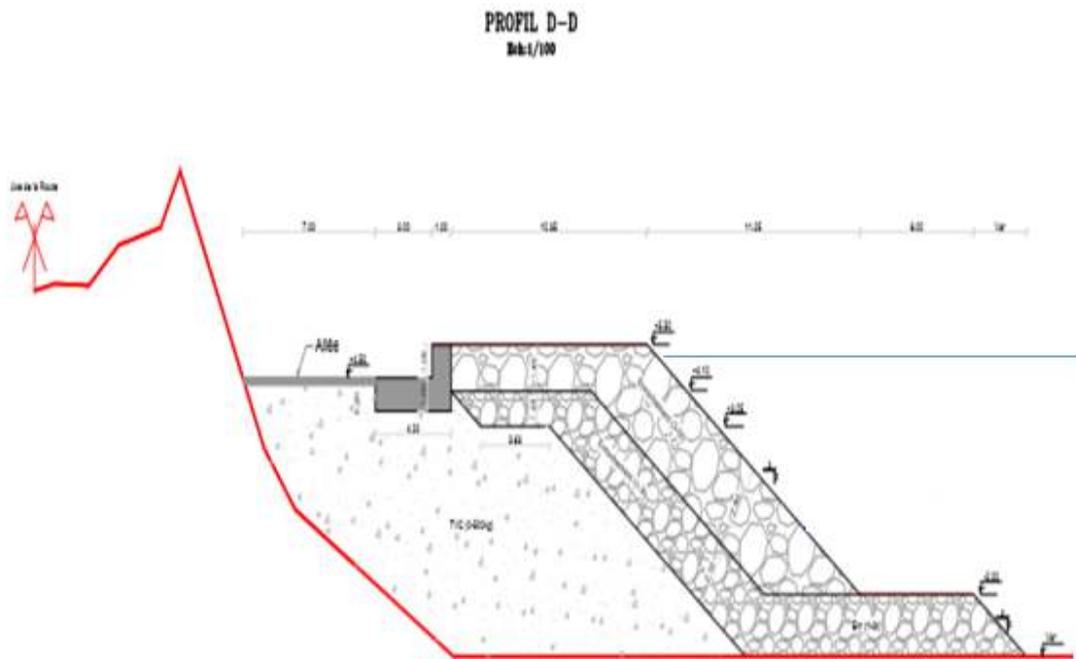


Figure IV.3. Profil B-B du projet

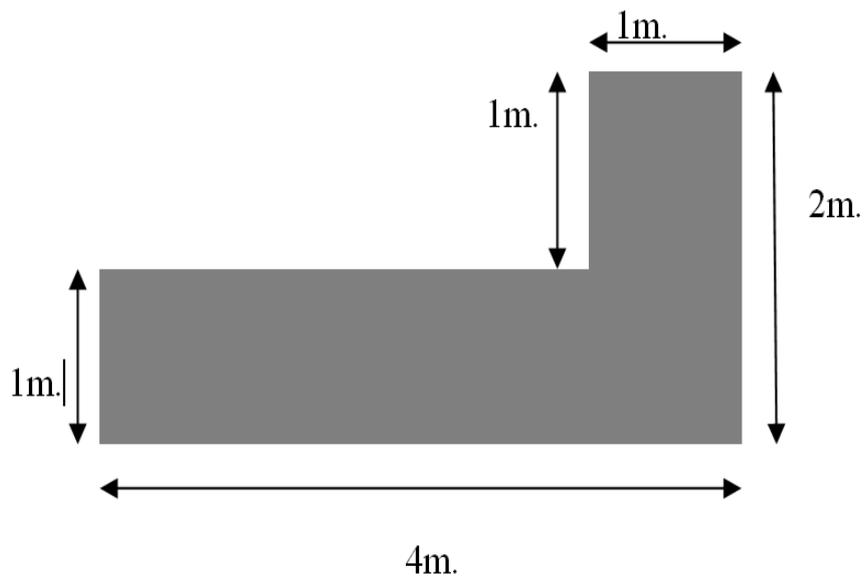


Figure IV.3. Géométrie de l'ouvrage.

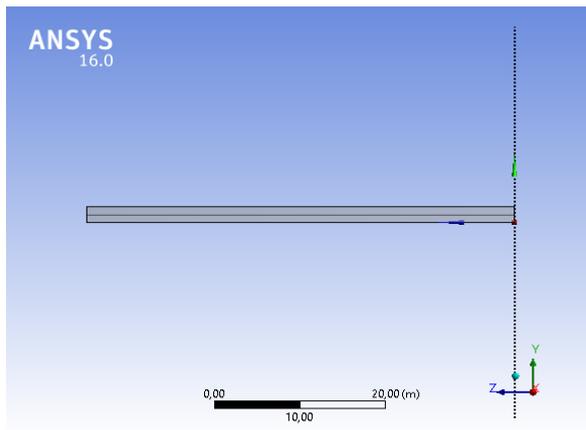


Figure IV.3.c: Vue de face.

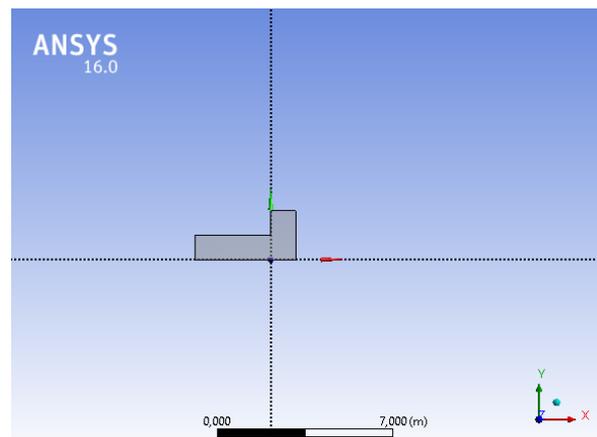


Figure IV.3.d : vue de profil.

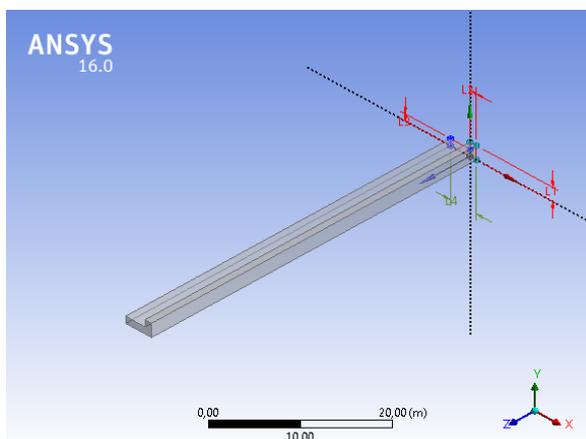


Figure IV.3.e : vue oblique

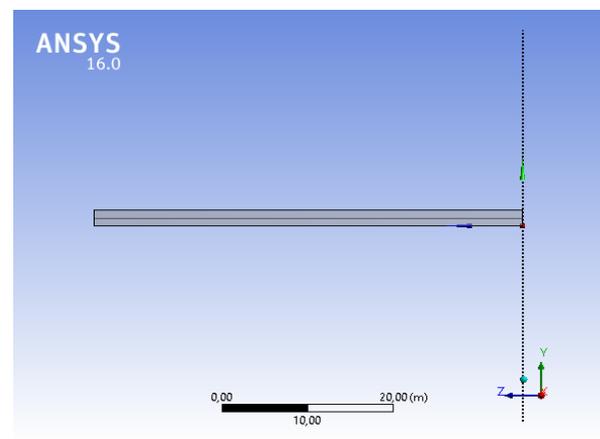


Figure IV.3.f : vue supérieur

IV-4. Propriété des matériaux :

IV-4.1. Béton armé :

L'analyse numérique impose la définition des caractéristiques de chaque matériau. Le choix du béton dans ce cas a pris en considération l'optimisation des performances et la durabilité de l'ouvrage, vu sa localisation dans un environnement marin qui représente un milieu défavorable. Cet élément ayant huit nœuds, et chaque nœud contient trois degrés de liberté, des translations dans les trois directions nodales. L'élément est capable de subir une déformation plastique et de se fissurer dans les trois directions

Pour les deux modèles (modélisation du mur sans renforcement et la modélisation du mur renforcé par matériaux composites) les propriétés du béton sont identiques et sont les suivantes :

Tableau IV.1: Propriétés de Béton armé

Module d'élasticité (E_c)	35000Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.2
Densité (δ)	3500Kg /m ³

IV-4.2. Matériau composite :

L'élément utiliser pour modéliser le matériau composite peut être composé de plusieurs couches dans différentes orientations et avec des propriétés ortho-tropique pour chacune des couches. Chaque un des nœuds a trois degrés de liberté et un déplacement dans chaque direction.

Les propriétés du renforcement sont comme suit :

IV-4.2. 1. Renforcement par lamelle :

Ce renforcement par PRFC se réalise par la colle des lamelles Sika CarboDur sur la surface des zone les plus tendu du béton armé []. Dans notre cas les lamelles sont appliqués au niveau de la paroi du mur.

a) Lamelles Sika CarboDur S1512 :

Les lamelles Sika CarboDursont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) réalisé en usine selon le procédé de pultrusion en usine et sous un contrôle stricte pur pouvoir garantir les caractéristiques du renfort PRFC. Ce contrôle de production se fait pour chaque lot de produit fini environ chaque 3000m en ce qui concerne le module d'élasticité, la résistance en traction et l'allongement à la rupture. Si non la largeur et l'épaisseur sont contrôlées a chaque en chaque rouleau de 250m. []

Tableau IV.2.1: Propriétés de CarboDur S1512

Module d'élasticité (E_c)	170000Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.3
Densité (δ)	1600 Kg/m ³

b) Colle époxydique Sikadur-30 :

C'est une colle époxydique Sikadur-30 sans solvant thixotrope ayant une couleur gris clair, valable pour le collage des lamelle Sika CarboDur.[82]

Les caractéristiques de la résine époxydique utiliser pour le renforcement du mur du quai sont les suivants :

Tableau IV.2.2: Propriétés de la résine Sikadur-30.

Module d'élasticité (E_c)	9600Mpa
Coefficient de poisson (ν)	0.4
Densité (δ)	1650 Kg/m ³

IV-5. Maillage :

Le maillage est un moyen de subdiviser l'ouvrage concerné par l'étude en éléments de même taille et de même propriétés, ensuite analysé chaque élément séparément. L'assemblage des éléments nous conduit à l'ouvrage initiale. La discrétisation en éléments finis est une étape de création et non pas de la solution.



Figure IV.5.1 : création du maillage

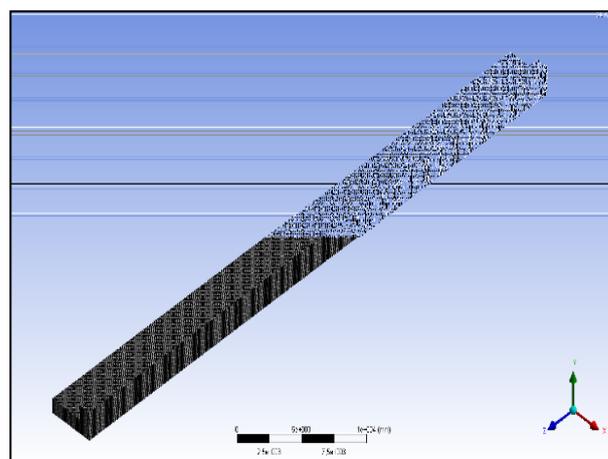


Figure IV.5.2 : maillage du mur

Le maillage se fait sur des lignes bien choisies (longueur, largeur et hauteur) de l'ouvrage ainsi que sa densité dans toutes les régions du mur. Cette discrétisation nous a donné un certain nombre de nœuds dont le total est résumé dans le tableau suivant :

Tableau IV.3: Nombre des Nœuds obtenu par la discrétisation du mur..

Le cas de modélisation	Nombre des Nœuds			Nombre totale
	Béton armé	Lamelles	Résine époxydique	
Sans renforcement.	186042	/	/	186042
Renforcer par matériaux composites.	186042	453189	453189	1092621

L'ouvrage a été discrétisé en élément cubique de 200mm de cote. Plus le maillage est fin plus le calcul est précis et l'exactitude de la simulation est élevée.

Tableau IV.4 : Nombre des éléments du mur.

Le cas de modélisation	Nombre éléments
Sans renforcement.	250000
Par matériau composite	362500

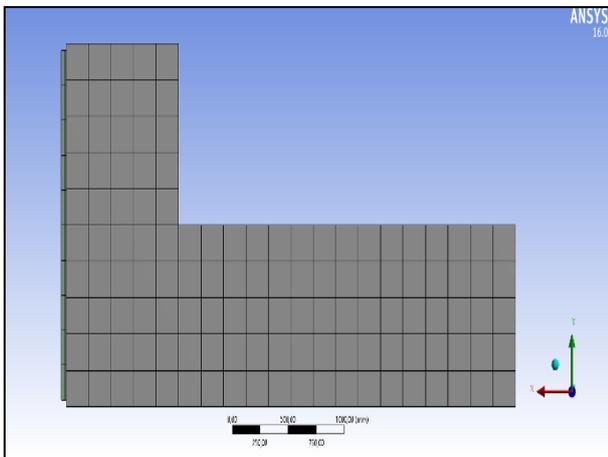


Figure IV.5.3 : création des nœuds.

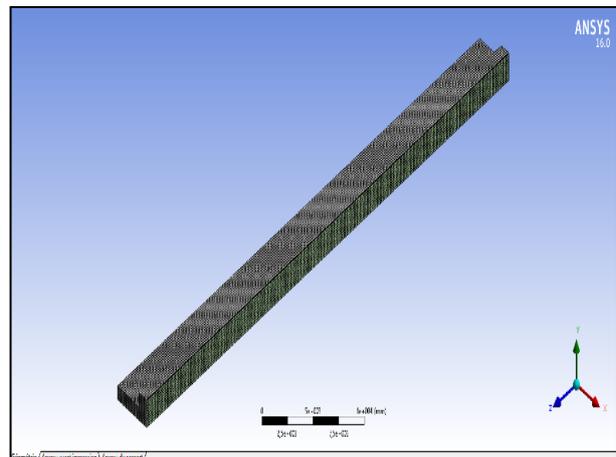


Figure IV5.4 : aperçu des nœuds.

IV.6- Conditions aux limites

Dans le modèle de notre étude l'axe X correspond à l'axe longitudinal du mur de quai et l'axe Y à l'axe verticale si non l'axe Z coïncide avec l'axe transversal.

Les conditions aux limites adoptées pour les deux cas de modélisation soit sans renforcement ou avec sont identiques. Des appuis fixes au niveau des parois latérales et arrière, dans lesquelles les déplacements sont bloqués suivant les trois directions (ox ; oy, oz), et un appui élastique au niveau de la fondation qui se repose sur une couche de sable saturée.

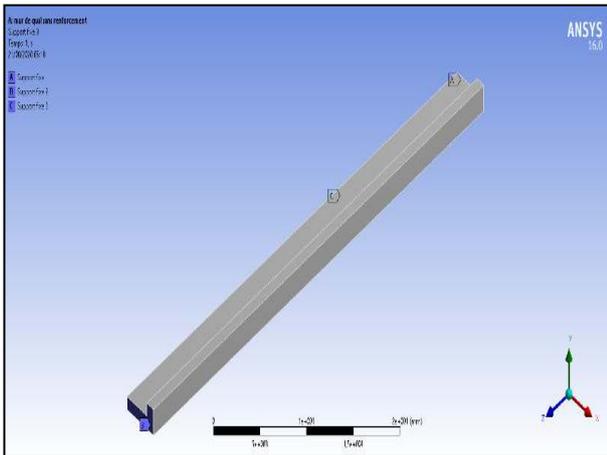


Figure IV.5.5 : conditions aux limites

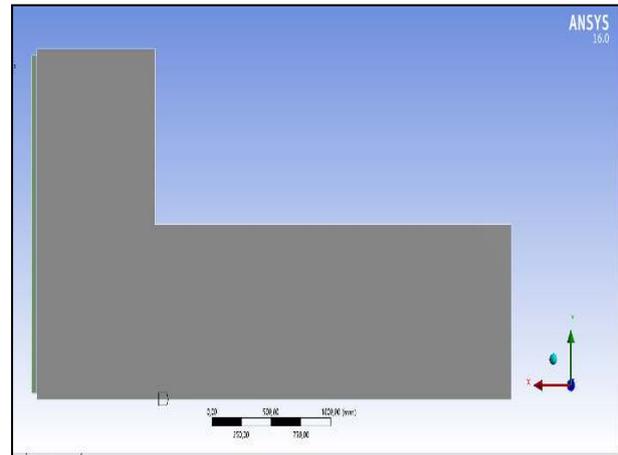


Figure IV.5.6 : support élastique.

IV.7.Modélisation des composites :

Les dimensions et les distances aux bords de lamelle et le tissu avec leurs résines époxydiques doit modélisés selon le Prescriptions de mise en œuvre particulières au procédé Sika CarboDur et SikaWrap mentionner dans le document technique fourni par la société Sika et agréés par Commission chargée de formuler des Avis Techniques et Documents Techniques d'Application

- a) Pose de la lamelle Sika CarboDur :
- Appliquer la colle Sikadur-30 par double encollage : une couche sur le support béton (1mm environ) et une couche sur la lamelle Sika CarboDur (1 à 1,5 mm) .
 - Distance aux bords : sur les bords de poutre à renforcer, il faut respecter une distance entre la lamelle et l'arête du mur. La lamelle doit être positionnée à une distance équivalente à au moins à l'enrobage des armatures internes du béton armé. Cela évite de renforcer une zone non armée sujette à fissuration.

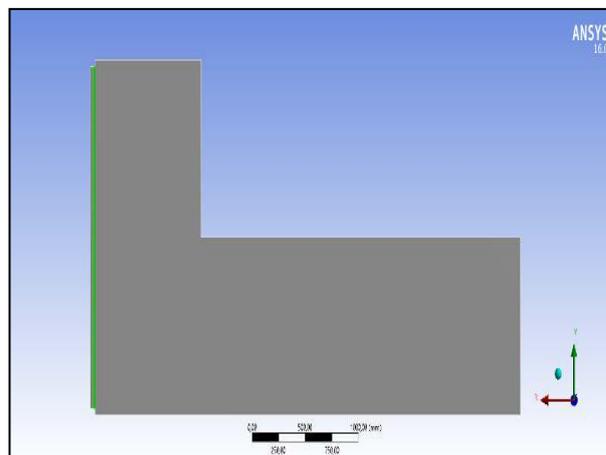


Figure IV.5.8 : l'application de la résine

L'encollage de la lamelle se fait généralement sur un plan de travail propre et protégé par un film plastique. L'application de la colle sur la lamelle est réalisée à l'aide d'une spatule ou d'une truelle langue de chat pour les faibles linéaires de lamelle ou à l'aide d'un dispositif d'encollage adapté pour les linéaires plus importants. [82].

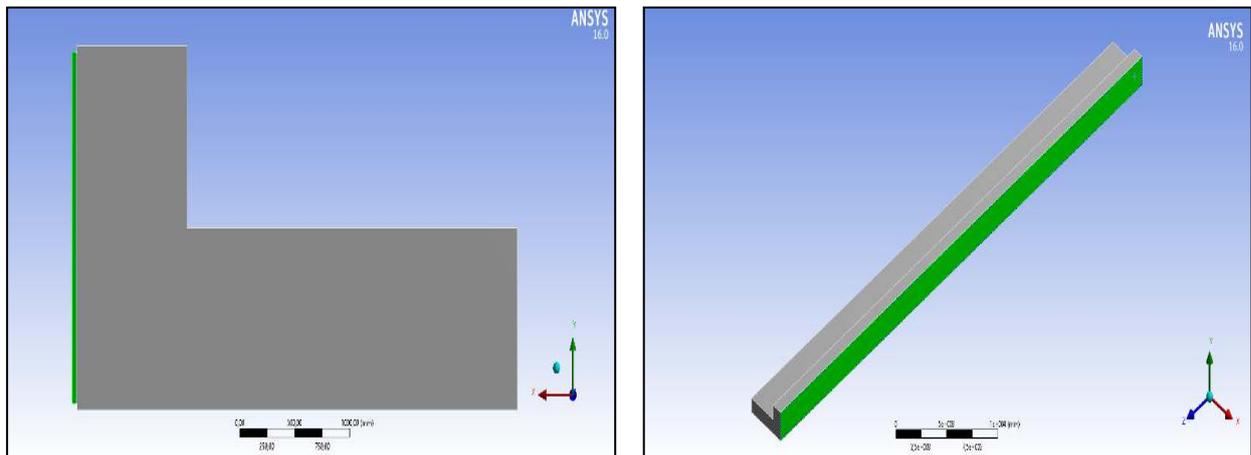


Figure IV.9 : renforcement par lamelles.

IV.8. la pression hydrostatique :

Le mur de quai modélisé dans notre cas est soumis à une pression hydrostatique exercé par l'eau de mer qui a une masse volumique de 1025kg/m³. Cette pression est appliqué sur les deux parois latérales et la façade avant. Cette pression est une force triangulaire

$$P = \frac{1}{2} * K * \gamma * h^2$$

appliqué a un tiers de la hauteur du mur par rapport a la base. Dans notre cas la pression est surfacique et cela devient

$$q = p * L/h \quad \Rightarrow q = \frac{1}{2} * k * \gamma * h \quad \text{avec} \quad \left\{ \begin{array}{l} \gamma = 1025 \text{kg/m}^3, K = 0,333 \text{ et } h = 2\text{m} \end{array} \right.$$

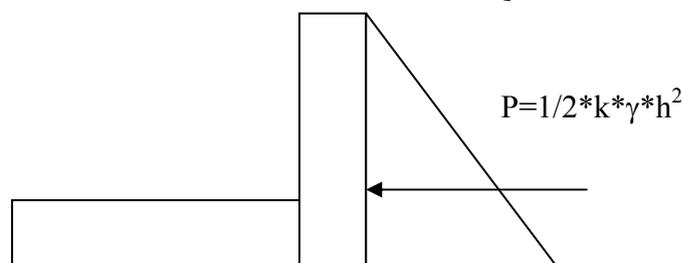


Figure IV.9 : schématisation de la pression.

Afin de simplifier les calculs on considère que la pression est appliquée sur toute la paroi

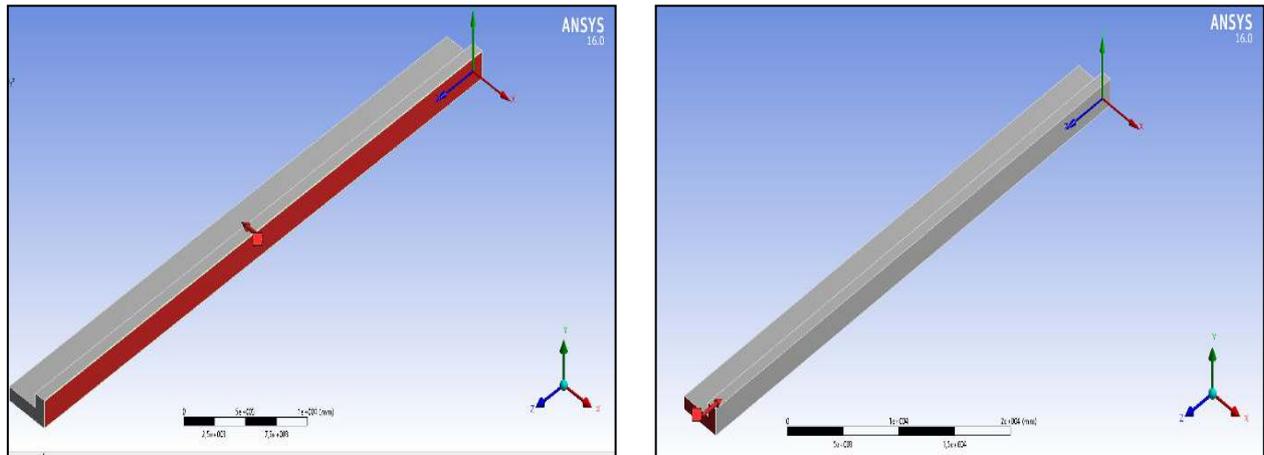


Figure IV.11 : Application de pression hydrostatique.

Conclusion :

La réalisation d'un modèle numérique nécessite l'insertion des dimensions réelles et tous les caractéristiques de chaque un des matériaux modéliser et le choix d'un maillage adéquat a fin d'avoir de meilleurs résultats et plus que l'ouvrage est important et subit des sollicitations importantes plus qu'il nécessite un nombre de nœuds élevé

Résultats et discussion

Résultats et discussion

V-1. Introduction :

L'analyse statique, faite, permet de déterminer les contraintes et les déformations de n'importe quelle structure soumise à des forces ou pressions statiques.

V-2. Résultats obtenu par l'analyse statique par ANSYS :

En ce qui concerne les résultats obtenus du calcul statique, qui sont les déformations et contraintes, après avoir subi une pression hydrostatique de l'eau sur la paroi du mur. Cela permet de même de visualiser les zones soumises aux contraintes lorsque elle subissent la pression ainsi que les parties les plus déformées et même animée. Les résultats peuvent être représentés sous forme de tableaux ou graphes.

V-3. Résultats numérique :

V-3.1. Mur de quai sans renforcement :

L'analyse statique du modèle du mur de quai choisi, a conduit à l'obtention des paramètres de la structure du mur étudié. Les contraintes et les déformations, déterminées par méthode des éléments finis fournis par l'ANSYS sont données dans le tableau ci-dessous avec les formes correspondantes illustrées dans les figures.

Tableau V.1. Valeurs des contraintes et déformations (avant renforcement)

Temps s	Déformations $*10^{-5} \mu\text{m}/\text{mm}$	Contrainte $\text{MPa} * 10^{-8}$
0	0	0
0.111	0,00023701	0,0004701
0.222	0,7021	1.4043
0.333	1,404	2,881
0.444	2,1059	4,2118
0.555	2,8078	5,6156
0.666	3,5097	7,0194
0.777	4,2116	8,4232
0.888	4,9135	9,827
0.999	5,6154	11,231
1	6,3173	12,635

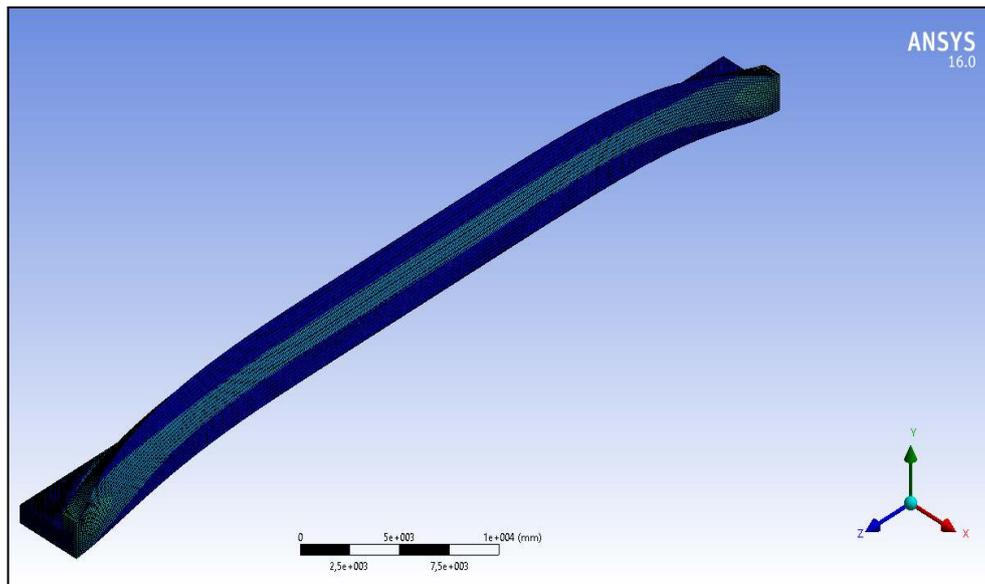


Figure V.1. Déformation du mur sans renforcement.

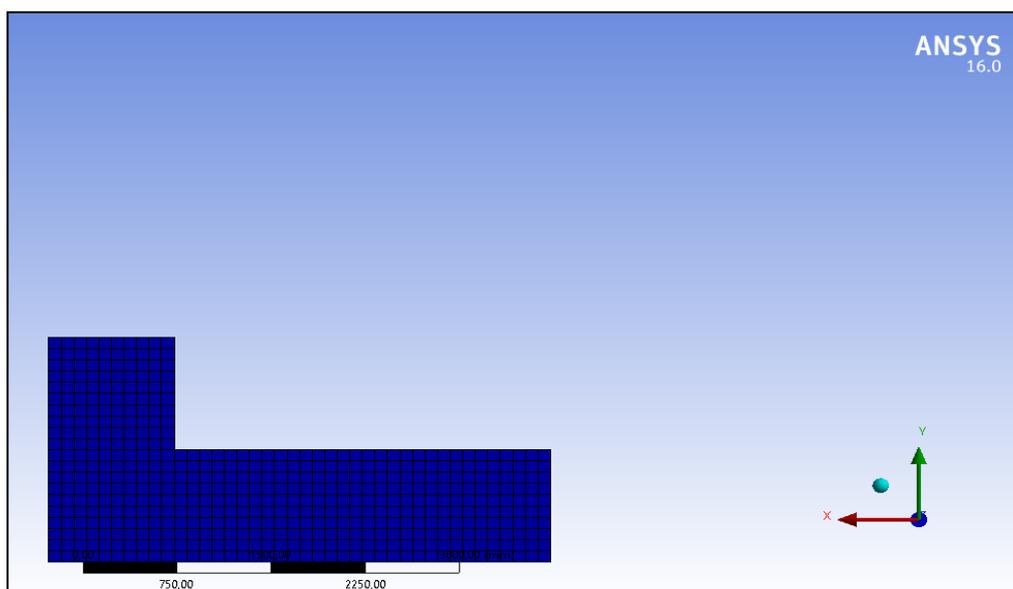


Figure IV.2. avant la déformation de l'ouvrage de l'ouvrage.

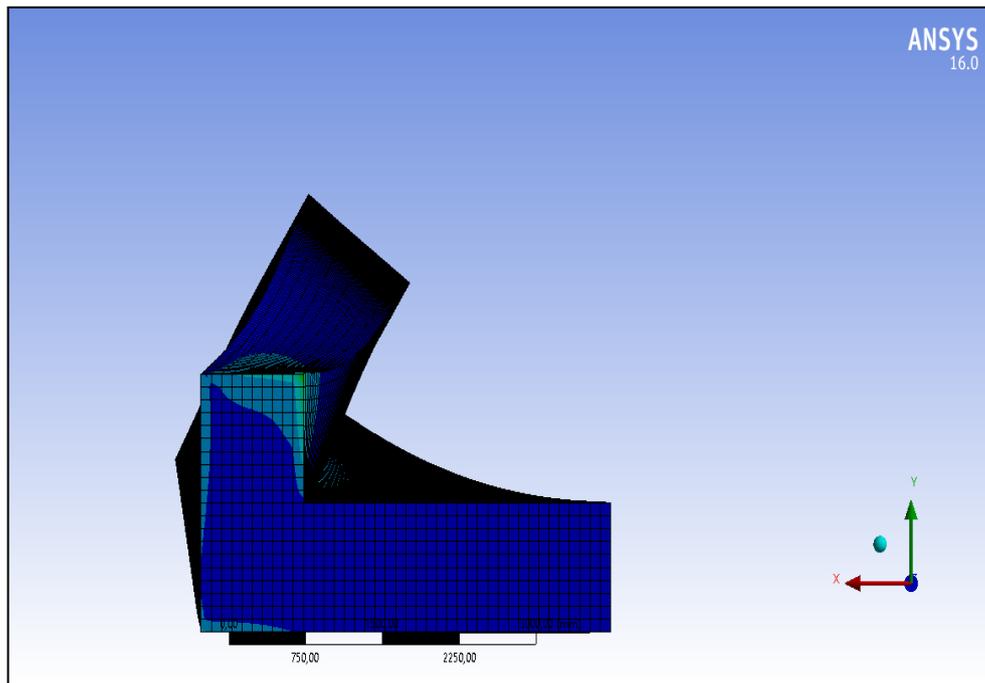


Figure V.3. Déformation du mur sans renforcement en 3D.

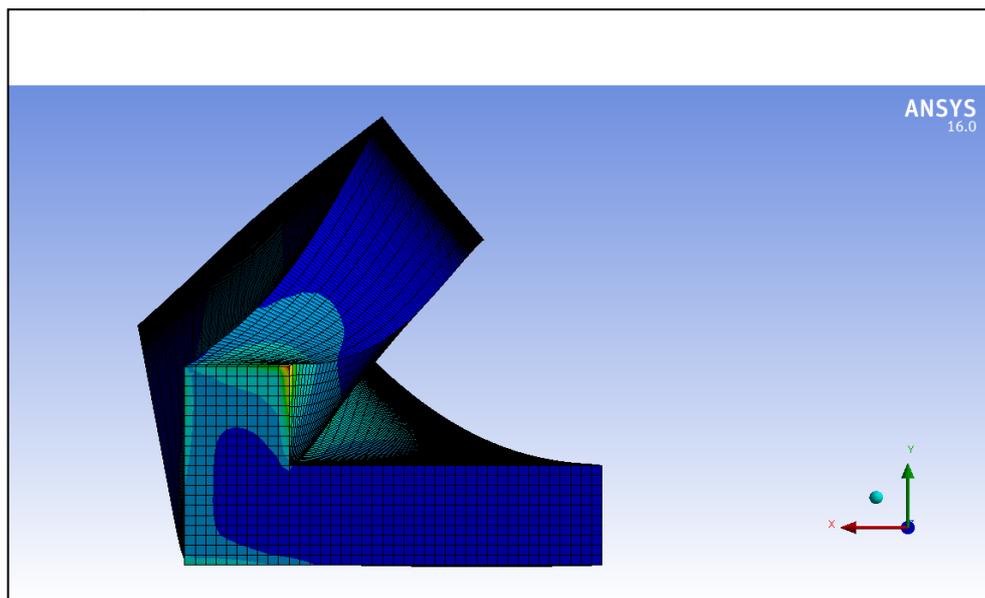


Figure V.4 Mur de quai avant renforcement

L'analyse statique de la structure du mur étudié renforcé par matériaux composite a été faite. Les contraintes et les déformations trouvées sont données dans le tableau ci dessous avec les formes correspondantes illustrées dans les figures.

Tableau V.2 : Valeurs de déformation et contraintes du mur renforcé

Temps s	déformations $t \cdot 10^{-14}$ mm/mm	Contrainte équivalent Mm/mm $\cdot 10^{-11}$
0	0	0
0.111	0,0056223	-9,3293
0.222	0,070122	-7,4242
0.333	1,4024	-5,519
0.444	2,1037	-3,6139
0.555	2,8049	-1,7087
0.666	3,5061	1,9461
0.777	4,2073	2,1016
0.888	4,9085	4,0067
0.999	5,6097	5,9118
1	6,311	7,817

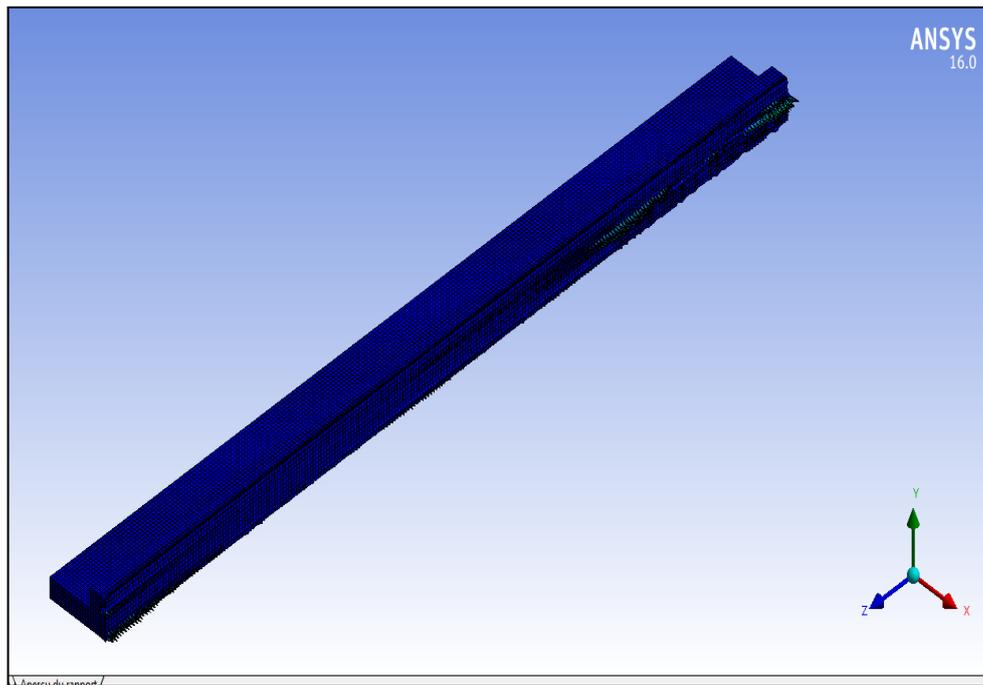


Figure V.5. Déformation du mur après renforcement.

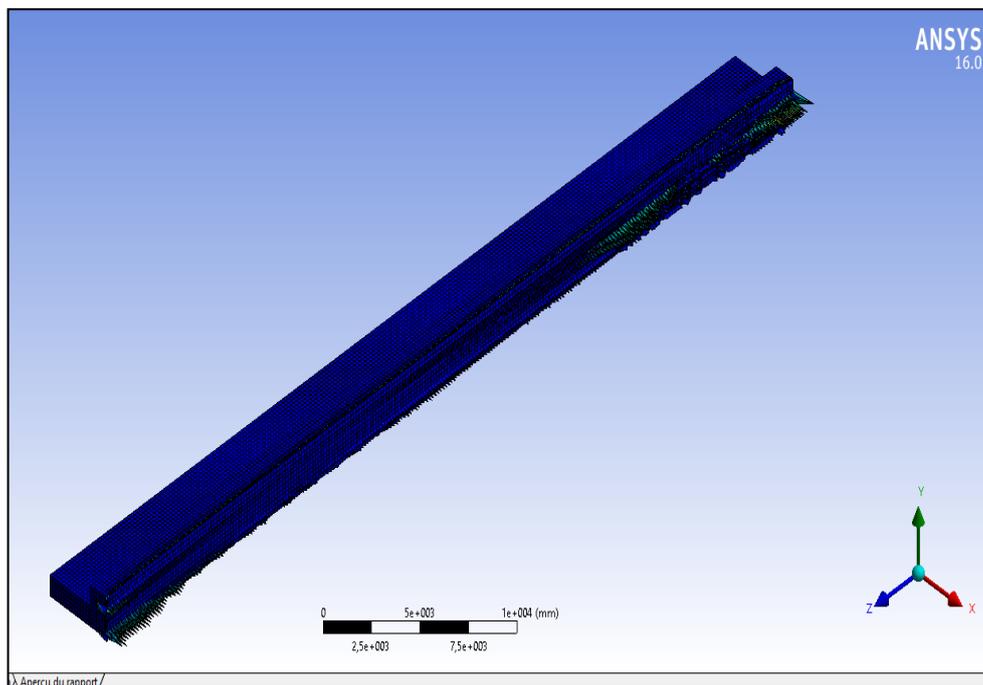


Figure V.6. Déformation du mur avec renforcement.

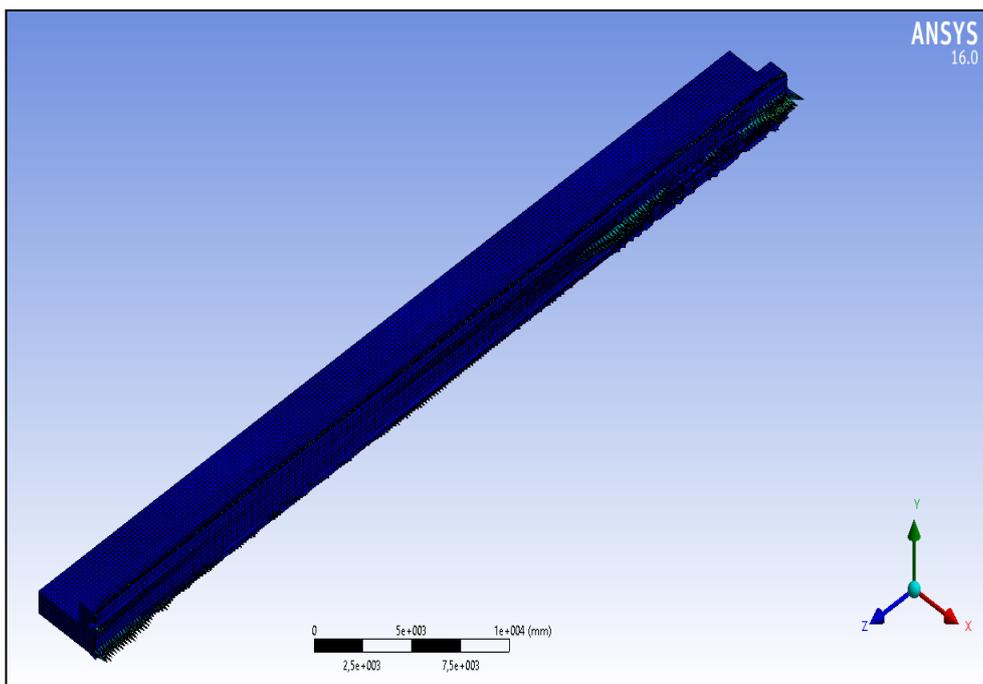


Figure V.7. Déformation du mur avec renforcement.

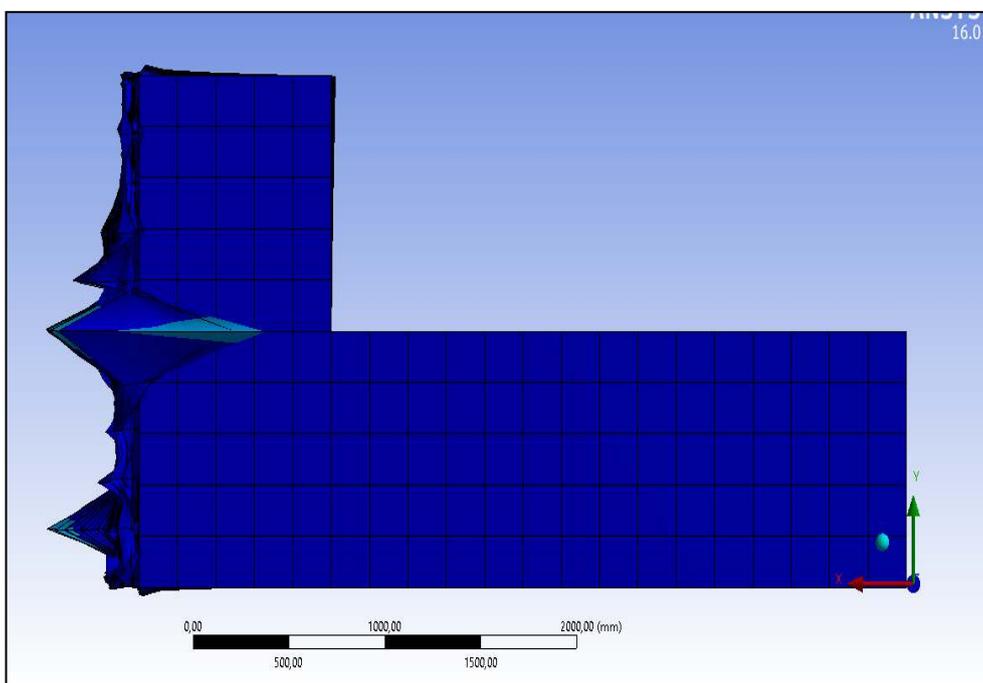


Figure V.8. Déformation du mur avec renforcement.

V-4. Comparaison et commentaires :

Le tableau V.3, représente la comparaison des valeurs numériques des contraintes et des déformations obtenues par la modélisation en éléments finis du mur de quai en deux cas dont le premier était sans renforcement et le deuxième était renforcé par un matériaux composites.

Tableau V.3 : Comparaison des valeurs de déformations

Temps s	Sans renforcement $*10^{-5}$ um/mm	Renforcé par MC $*10^{-5}$ um/mm
0	0	0
0.111	0,00237	0,005622
0.222	0,7021	0,070122
0.333	1,404	0,14024
0.444	2,1059	0,21037
0.555	2,8078	0,2804
0.666	3,5097	0,35061
0.777	4,2116	0,42073
0.888	4,9135	0,49085
0.999	5,6154	0,56097
1	6,3173	0,6311

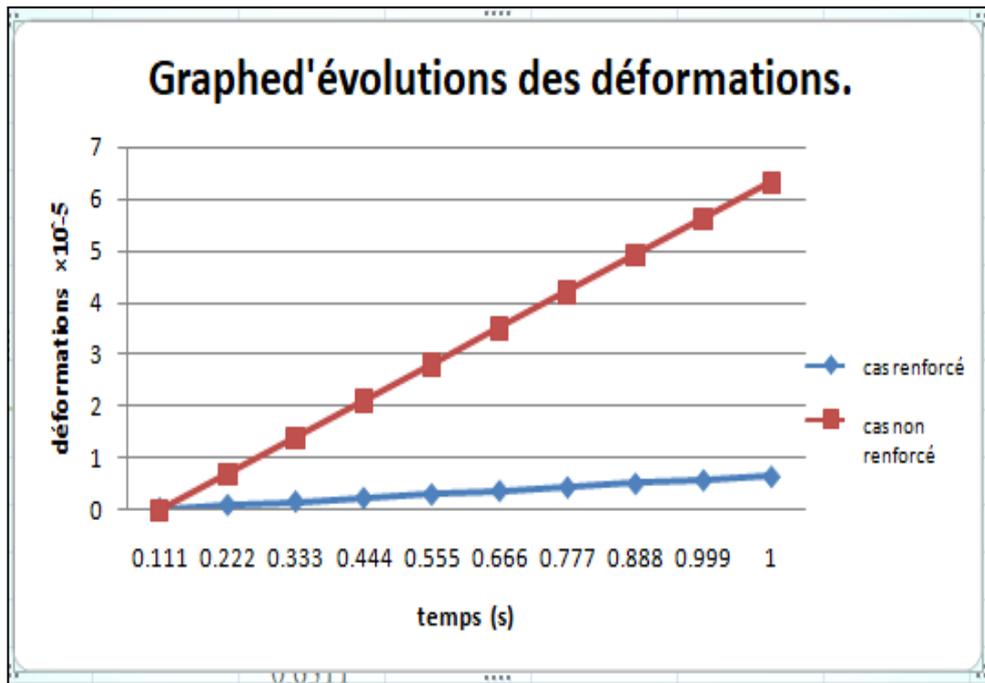


Figure V.9: évaluation des valeurs des déformations pour les deux cas.

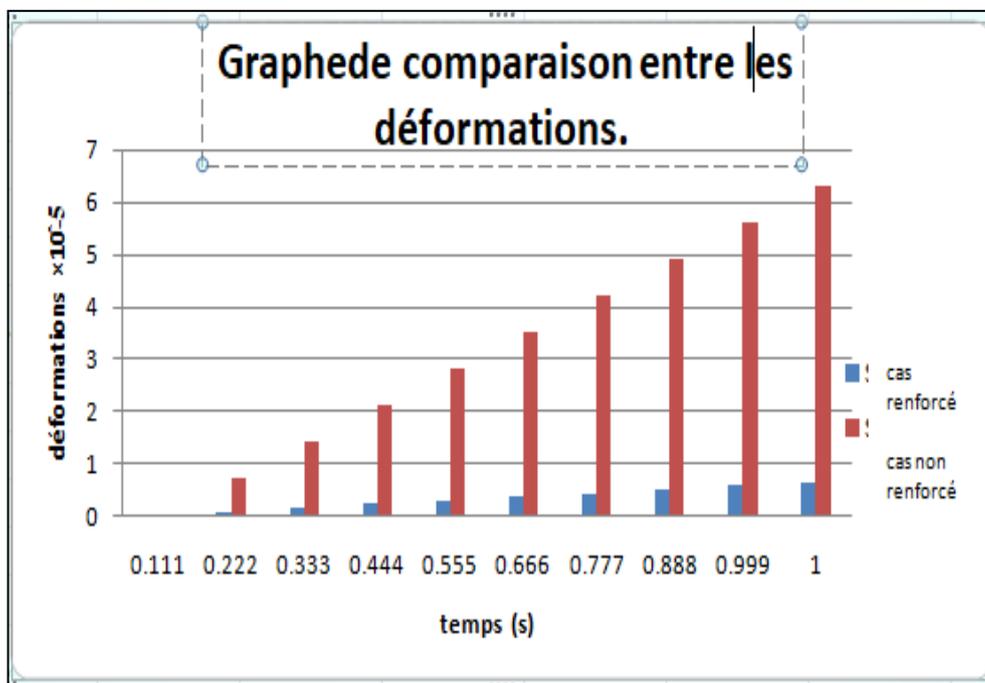


Figure V.10. Graphe de comparaison de déformation entre les deux cas

Conclusion :

Le dimensionnement et la caractéristique des matériaux constituant le mur de quai modélisé sont identiques dans les deux cas d'étude, Ainsi que la force appliqué. Main on a obtenue une déférence en résultats très remarquable cette dernière revient aux matériaux composite ajouté a l'ouvrage.

Conclusion Générale Et Recommandations

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Notre travail consistait à contribuer à la compréhension de l'influence des matériaux composites sur le comportement d'une structure maritime sou l'effet de la pression de l'eau. Il s'agit d'un travail qui lit le coté géotechnique et l'insertion d'un matériau innovant pour le renforcement. L'étude réalisée nous a permis d'identifier un certain nombre de pathologie des ouvrages maritimes qui sont exposé en zone de marnage, ainsi que les différentes techniques de réparation et/ou renforcement appliqué sur ces ouvrages en béton armé. On a appliqué la techniques de renforcement par collage de lamelles de Sika Carbo-Dur » qui a pour avantage, la durabilité, la rigidité, la simplicité de mise en œuvre.

Nous avons élaboré un modèle par le biais du logiciel Workenbench- Ansys 16. Les résultats obtenus montrent le gain apporté (en déformations, contraintes ou en périodes de vibrations de l'ouvrage), nous avons obtenu des résultats très satisfaisants. En effet, le calcul des déformations et des contraintes nous a permis de prédire la stabilité du mur de quai par l'insertion des lamelle collées a la parois de face, avec des gain allant de 3% à 15%. Pour la période de vibration, le mur se stabilise avec un taux de gain de 20.5%.

Vu le manque de temps pour l'achèvement de tout le travail projeté, Nous recommandons pour les futurs travaux de Master ou de recherche, des travaux expérimentaux avec des modèles réduits et/ou in situ, pour caler les résultats trouvés et mener à terme le travail initiée par cette étude.

Référence

- [1] Boujmaa.S ‘‘ dimensionnement d’un ouvrage maritime’’ master, université de Blida,2015.
- [2]Mardy L’’ Etude des ouvrages maritimes et fluviaux renforcés par matériaux composites’’ thèse de doctorat, université d’Artois 2013.
- [3]Haddam .A, ‘Aménagement d’un port de pêche de sidi youchàa’’ master, université de Telemcen 2015.
- [4] M. Dekoster, "Etude du comportement mécanique des structures en béton armé dégradé par la corrosion," Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, 2003.
- [5] Documentation Technique CIM Béton, "Les bétons et les ouvrages en site maritime - T 93."
- [6]Khobizi .S,’’ réhabilitation des structure maritime en béton armé ‘’, master, université de Guelma,2017
- [7] CAUDE G. (2008). Pathologies des ouvrages portuaires : méthodes d’investigation. France, 90 p.
- [8] N. P. Mailvaganam, et al. (1998, Réparation du béton : préparation de la surface. Available: <http://archive.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/sc/ctus-n24.html>
- [9] Belhadji D, ‘synthèse et caractérisations de composites polyéthylendioxyde thiophène’’, Magister, Université d’Oron.
- [10] J.V.MIRANDA, techniques et systèmes de renfort des structures en béton 2004.
- [11] Abdessemed M, Etude expérimentale et modélisation numérique du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites sous flexion- Cas des ponts, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2011.
- [12] J.M.BERTHELOT, matériaux composites: comportement mécanique et analyse des structures, TEC et DOC 4eme édition, 2002.
- [13] Document scientifique et techniques AFGC, réparation et renforcement des structures en béton au moyen de matériaux composites, année 2007
- [14] Chapitre 2 Méthode des éléments finis et modélisation des plaques
- 15] Houam.H ‘‘Etude numérique d’un mur de soutènement en sol stabilisé et renforcé avec fibre et géogrilles’’ université de Anaba,2010
- [16] Avis Technique 3/16-875 (2012), "Sika CarboDur SikaWrap", Annule et remplace l’Avis Technique 3/10-669 ,(arrêté du 21 mars 2012).

