

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث 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

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux en Génie Civil

Sujet de mémoire

**Amélioration des performances mécaniques des résines
époxydiques pour le renforcement par nano-composites**

Présentée par :

Kechouane Fouad

Encadré par :

Dr. M. Abdessemed

Année universitaire : 2019-2020

DEDICACES

A ma très chère mère qui s'est tant sacrifiée pour les besoins de mon étude.

A mon très cher père.

A mes très chers frères.

A mes très chères sœurs.

A toute ma famille maternelle et paternelle.

A tous mes amis .

A tous ceux qui m'aiment.

Kechouane Fouad

Remerciements

Je remercie Le Bon Dieu pour son aide et sa protection durant cette pandémie "Covid19". Merci d'avoir rendu ma vie réjouissante et significative. Je le prie encore pour m'aider à apprendre plus.

Je tiens à remercier, mon encadreur Dr. M. Abdessemed pour m'avoir proposé le sujet de ce mémoire, son soutien durant tout mon travail et sa manière et sa qualité d'encadrement et ses précieux conseils.

Je tiens également à remercier le président de jurés Pr. S. Kenai pour leur présence et pour m'avoir accepté de juger mon travail

Mes remerciements s'adressent aussi à mon examinateur Dr. W. Yahiaoui pour donner moi le temps pour juger mon travail et pour leurs conseils

Je tiens également à remercier Dr. Si-Ahmed Chef département de génie civil à l'université de Blida "1" pour tous ses supports

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes enseignants, le personnel du département de génie civil ainsi que tous les étudiants qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à ma mère qui a beaucoup sacrifié pour que je puisse atteindre mon but, celui de réaliser son rêve, sans oublier tous mes amis.

Mes remerciements s'adressent également à toutes autres personnes avec lesquelles j'ai eu le plaisir de collaborer au cours de ces dernières années.

ملخص:

المركبات النانوية هي عبارة عن مواد تتكون من مركبين أو أكثر أحدهما له أبعاد نانومترية، يتم دمجه مع مركب آخر من أجل الحصول على مادة أفضل من حيث الخصائص الفيزيائية، الكيميائية، الميكانيكية والحرارية، يتم إضافة كميات صغيرة من جزيئات الكربون النانوية إلى الراتنجات من أجل ضمان سطح التماس أكبر مع مصفوفات البوليمرات مما يسمح بتحسين خصائص الراتنجات الإبوكسية وتعزيز مدى التصاق المركبات بالأجزاء الإنشائية.

في هذه المذكرة قمنا بدراسة تأثير الأنابيب النانوية الكربونية المضافة إلى راتنج الإيبوكسي في حالة التعزيز الخارجي للعناصر الهيكلية بواسطة المركبات العادية أو المركبات النانوية، تم تطوير عمل رقمي على الهياكل الخرسانية لجسر، من خلال تطبيق طريقة العناصر المحدودة باستخدام البرنامج الأكاديمي أنسيس 2020

الكلمات المفتاحية: التعزيز، المركبات، المركبات النانوية، راتنجات الإيبوكسي، مصفوفة البوليمر، النمذجة، طريقة العناصر المحدودة، الهيكل، الخرسانة، الجسر

Résumé

Les nano-composites sont des substances composées de deux composés ou plus, dont l'un a des dimensions nanométriques, qui sont combinés avec un autre afin d'obtenir un meilleur matériau en termes de propriétés physiques, chimiques, mécaniques et thermiques, Des petites quantités de nanoparticules de carbone sont ajoutées aux résines afin d'assurer une surface de contact plus grande avec la matrice polymère, ce qui permet d'améliorer les propriétés de la résine époxydique et d'améliorer l'adhésion des composites avec les éléments structurels .

Dans ce mémoire, on a étudié l'effet des nanotubes de carbone ajoutés à la résine époxydique dans le cas de renforcement externe des éléments structurels par composites ordinaires ou par des nano-composites. Un travail numérique a été élaboré sur des structures d'un pont en béton armé, en appliquant la méthode des éléments finis (MEF), par le biais du logiciel académique Ansys 2020.

Mots-clés : Renforcement, Composites, Nano-composites, Résines époxydique, Matrice polymère, Modélisation, MEF, Structure, Béton, Pont.

Abstract

Nano-composites are substances consisting of two or more compounds, one of which has nanoscale dimensions, which are combined with another in order to obtain a better material in terms of physical, chemical, mechanical and thermal properties, Small quantities of carbon nanoparticles are added to the resins in order to ensure that the contact surface are larger with polymer matrices, which allows to improve the properties of epoxy resin and enhance the adhesion of the composites with the structural elements.

In this memory, we studied the effect of carbon nanotubes added to the epoxy resin in the case of external reinforcement of structural elements by ordinary composites or by nano-composites. Numerical work has been developed on a reinforced concrete bridge structures, by applying the finite element method (FEM), using the Ansys 2020 academic software.

Keywords : Renforcement, Composites, Nano-composites, Epoxy resins, Polymer matrix, Modeling, FEM, Structure, Concrete, Bridge

Table des Matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Tables des matières.....	iv
Liste des figures.....	vii
Liste des tableaux	ix
Liste des symboles et abréviations	x

Introduction générale

1. L'état des lieux	1
2. Problématique	1
3. Objectifs	1
4. Organisation de la thèse.....	1

Chapitre I: Etude Bibliographique

I.1-Dégradations du béton	2
I.1.1- Introduction.....	2
I.1.2- Les types de dégradations.....	2
I.2- Méthodes de diagnostic.....	6
I.2.1- Préambule.....	6
I.2.2- Examen visuel ou morphologique	6
I.2.3- Essais sur le béton.....	6
I.3- Méthodes de réparation et renforcement des structures en béton.....	8
I.3.1- Introduction	8
I.3.2- Le chemisage.....	9
I.3.3- Tôles d'acier collées.....	10
I.3.4- Béton projeté.....	11
I.3.5- Précontrainte additionnelle.....	13
I.3.6- Injection de résine dans les fissures.....	13
I.3.7- Renforcement par tissu de fibres de carbone (TFC)	13
I.3.8. - Conclusion	15
I.4- Matériaux composites.....	16
I.4.1- Introduction.....	16
I.4.2 - Lecture statistiques des réparations par matériaux composites.....	16
I.4.3- Les MC et les résines appliquées pour le renforcement.....	17
I.4.3 .1. Introduction	17
I.4.3 .2. Les types de Matériaux composites	18
I.4.2.2.1. Les fibres.....	18
I.4.2.2.2. Les matrices.....	20
I.4.2.4. Propriétés mécaniques des composites.....	20
I.4.2.4. Comparaison des performances pour le renforcement des structures..	21
I.4.4 - Les résines pour les Matériaux composites.....	22
I.4.3 .1. Introduction.....	22
I.4.3 .2. Les résines.....	22
I.4.3.2.1. Les résines thermodurcissables.....	22

I.4.3.2.1. 1.Les résines Polyesters non saturés.....	22
I.4.3.2.1. 2.Epoxydes.....	23
I.4.3.2.2. Les résines thermoplastiques	23
I.4.5 - Conclusion	25
I.5- Les Nano-Composites	26
I.5.1. Introduction.....	26
I.5.2. Les Composites (Classique) de CFRP.....	26
I.5.3. Les nano-composites à matrice polymère et renfort (CNT)	27
I.5.4. La différence entre les Nano-composites et les composites classiques	27
I.5.5. Classification des Nano-composites.....	28
I.5.6. Propriétés des Nano-composites (polymère/NTC).....	28
I.5.6.1. Propriétés mécaniques	28
I.5.6.2. Conductivité thermiques	28
I.5.6.3. Comportement au feu.....	28
I.5.7. Interface matrice-renfort dans les N.C à matrice polymère.....	28
I.5.8. L'effet des Nano-composites sur les résines époxydes.....	29
I.5.9. Conclusion.....	30
I.6- Nano-Renforts.....	30
I.6.1. Introduction.....	30
I.6.2. Les nanocharges ou nano-renfort	30
I.6.3. Les familles de nanocharges ou nano-renfort	30
I.6.4. Classification de nanocharge ou nano-renfort	31
I.6.4.1. Classifications selon leur géométrie.....	31
I.6.4.1.1. Renforts de types 3Dimentions	31
I.6.4.1.2. Renforts de type 2Dimentions	31
I.6.4.1.3. Renforts de type 1Dimention	31
I.6.4.2. Classifications selon leur nature	32
I.6.4.2.1. Noir de carbone.....	32
I.6.4.2.2. Les poudres métalliques.....	33
I.6.4. 2.3.Feuillet Argile.....	33
I.6.4.2.4. Le graphène.....	33
I.6.4.2.5. Les nano fibrilles de cellulose.....	34
I.6.4.2.6. Nanotubes ou Nano fibres de carbone.....	34
I.6.5. Conclusion.....	35

Chapitre II : Analyse numérique et cas d'étude

II.1 - Méthode des éléments finis.....	36
II.2 - Logiciel ANSYS	38
II.3 -Analyse Numérique et cas d'étude.....	40
II.3.1 - Introduction.....	40
II.3.2- Description Du Cas D'étude.....	40
II.3.3- Géométrie des éléments de l'ouvrage.....	41
II.3.4- Propriétés des matériaux.....	43
II.3.4.1- Béton armé.....	43

II.3.4.2- Les composites.....	43
II.3.4.2.1-Renforcement par lamelle.....	44
II.3.4.2.2-Renforcement par tissu.....	45
II.3.5- Maillage	46
II.3.6- Conditions aux limites.....	48
II.3.7. Modélisation des composites.....	48
II.3.7.1-Pose de la lamelle Sika CarboDur.....	48
II.3.7.2-Application du tissu SikaWrap-600 C	49
II.3.7.3-Géomètres des composites.....	51
Chapitre III: Résultats et discussion	
III.1: Introduction.....	52
III.2: Différences entre analyse modale et analyse statique.....	52
III.3: Différences entre analyse modale et les autre analyses.....	53
III.4: Résultats obtenus grâce à une analyse modale par ANSYS.....	54
III.5: Résultats numériques du modèle choisi	54
III.5.1: Modélisation de pont sans renforcement.....	54
III.5.2: Modélisation de pont renforcé par MC traditionnels.....	61
III.5.3: Modélisation de pont avec insertion des nano composites.....	68
III.6-Comparaison et commentaires	74
Conclusion générale et recommandations.....	77
Références Bibliographiques	78

Liste des Figures

Figure I.1 : Gonflement de l'acier de béton.....	2
Figure I.2: Procédure de l'attaque des sulfates	2
Figure I.3 : Quelques cas de dégradations.....	5
Figure I.4 : tassement différentiel	5
Figure I.5 : Le carottage de béton	6
Figure I.6: Scléromètre numérique.....	7
Figure I.7 : Sonde de Windsor	7
Figure I.8 : Le fissuromètre numérique	8
Figure I.9 : Projection par voie sèche.....	12
Figure I.10 : Projection par voie humide	13
Figure I.11: poteau confiné par TFC	15
Figure I.12: poutre renforcée par TFC	15
Figure I.13: Différents types de matrices	20
Figure I.14 : Production mondiale (en tonnes) de nano-composites polymères	26
Figure I.15: Application des résines époxy	29
Figure I.16 : Classification des nano-composites selon la géométrie du renfort.....	31
Figure I.17 : Vue en coupe d'une particule de noir de carbone	32
Figure I.18 : Graphène à partir du graphite	33
Figure I.19 : Nanotube du carbone	34
Figure II.1 : Détails du pont d'Oued el Hachem.....	40
Figure II.2: Géométrie de l'ouvrage.....	41
Figure II.3: Géométrie d'infrastructure de pont.....	41
Figure II.4 : Vue de face du pont.....	42
Figure II.5 : Vue de côté du pont.....	42
Figure II.6: Vue supérieur du pont.....	42
Figure II.7: Vue inférieur du pont.....	42
Figure II.8 : Vue oblique du pont.....	42
Figure II.9 : Solid 65 à 3D	43
Figure II.10: Solid 185 à 3D	44
Figure II.11: Création des mailles du pont	46
Figure II.12: Maillage du pont.....	46
Figure II.13: Création des nœuds du pont	47
Figure II.14: Aperçu des nœuds.....	47
Figure II.15: Conditions aux limites	48
Figure II.16: Fondations bloqués.....	48
Figure II.17 : Sikadur-30	49
Figure II.18 : La position de Sikadur-30.....	49
Figure II.19 : Sika CarboDur.....	49
Figure II.20 : Position de Sika CarboDur.....	49
Figure II.21 : SikaWrap-600C.....	50
Figure II.22 : Sikadur-300.	50
Figure II.23 : Position de SikaWrap-600C.....	50

FigureII.24 : Vu de SikaWrap-600C.....	50
FigureII.25 : Vu(o,yz) du composites.....	51
FigureII.26 : Vu(o,xz) du composites.....	51
FigureII.27 : La résine lamelle.....	51
FigureII.28 : La résine et le tissu	51
Figure III.1 : Courbe des fréquences de pont renforcé par M.C traditionnels.....	55
Figure III.2 : Courbe des périodes de pont renforcé par M.C traditionnels.....	56
FigureIII.3: Model 1.Translation longitudinal(N).....	56
FigureIII.4 : Mode 2. Premier fléchissement vertical(Y).....	57
FigureIII.5 : Mode 3. Torsion simple.....	57
FigureIII.6 : Mode 4. Deuxième fléchissement vertical(Y).....	58
FigureIII.7 : Mode 5. Double torsion du tablier.....	58
FigureIII.8 : Mode 6. Translation latérale (E).....	59
FigureIII.9 : Mode 7. Translation latérale (E).....	59
FigureIII.10 : Mode 8. Fléchissement fort	60
FigureIII.11 : Mode 9. Translation latérale (E).....	60
FigureIII.12 : Mode 10. Translation latérale (E).....	61
FigureIII.13 : Courbe des fréquences de pont renforcé par M.C traditionnels.....	62
FigureIII.14 : Courbe des périodes de pont renforcé par M.C traditionnels.....	62
FigureIII.15: Model 1. Translation longitudinal(N).....	63
FigureIII.16 : Mode 2. Premier fléchissement vertical(Y).....	63
FigureIII.17 : Mode 3. Torsion simple.....	64
FigureIII.18 : Mode 4. Deuxième fléchissement vertical(Y).....	64
FigureIII.19 : Mode 5. Double torsion du tablier	65
FigureIII.20 : Mode 6. Translation latérale (E).....	65
FigureIII.21 : Mode 7. Translation latérale (E).....	66
FigureIII.22 : Mode 8. Translation latérale (E).....	66
FigureIII.23 : Mode 9. Translation latérale (E).....	67
FigureIII.24 : Mode 10. Translation latérale (E).....	67
FigureIII.25 : Courbe des fréquences de pont renforcé par nano composites.....	68
FigureIII.26 : Courbe des périodes de pont renforcé par nano composites.....	69
FigureIII.27: Model 1. Translation longitudinal(N).....	69
FigureIII.28 : Mode 2. Premier fléchissement vertical(Y).....	70
FigureIII.29 : Mode 3. Torsion simple.....	70
FigureIII.30 : Mode 4. Deuxième fléchissement vertical(Y).....	71
FigureIII.31 : Mode 5. Double torsion du tablier	71
FigureIII.32 : Mode 6. Translation latérale (E).....	72
FigureIII.33 : Mode 7. Translation latérale (E).....	72
FigureIII.34 : Mode 8. Translation latérale (E).....	73
FigureIII.35 : Mode 9. Translation latérale (E).....	73
FigureIII.36 : Mode 10. Translation latérale (E).....	74
FigureIII.37 : Graphe de comparaison des fréquences de 3 cas étudiés.....	75
FigureIII.38 : Graphe de comparaison des périodes de 3 cas étudiés.....	76

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des tôles collée.....	11
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de projection par voie sèche	11
Tableau I.3: Avantages et inconvénients de projection par voie humide	12
Tableau I.4 : Avantages et inconvénients de renforcement par TFC.....	15
Tableau I.5: Comparaison entre composites et acier.....	16
Tableau I.6: Exemples de matériaux composites.....	18
Tableau I.7 :- Propriétés mécaniques des composites.....	21
Tableau I.8 : Comparaison qualitative entre Verre- E, Carbone-H. T et fibres Aramide.....	21
Tableau I.9 : Caractéristiques mécaniques des résines époxy	23
Tableau I.10 : comparaison des matrices TD et TP.	24
Tableau II.1 : Organigramme d'étapes logiques du calcul par éléments finis.....	36
Tableau II.1 : Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis.....	37
Tableau II.3: Propriétés de Béton armé.....	43
Tableau II.4: Propriétés de CarboDur S1512.....	44
Tableau II.5: Propriétés de la résine Sikadur-30.	45
Tableau II.6: Propriétés de la résine Sikadur-30 amélioré.	45
Tableau II.7: Propriétés de SikaWrap -600 C.....	45
Tableau II.8: Propriétés de la résine Sikadur-300.....	46
Tableau II.9: Propriétés de la résine Sikadur-300 amélioré.	46
Tableau II.10 : Nombre des Nœuds de pont.	47
Tableau II.11 : Nombre des éléments de pont.	47
Tableau II.12: Géomètres des composites.....	51
Tableau III.1: Les types d'analyse.....	53
Tableau III.2: Schéma l'analyse modale.....	54
Tableau III.3: Valeurs des fréquences obtenues par ANSYS.....	55
Tableau III.4: Valeurs des fréquences obtenues par ANSYS.....	61
Tableau III.5: Valeurs des fréquences obtenues par ANSYS.....	68
Tableau III.6 : Comparaison sommaire des valeurs du fréquences de 3 cas étudiés	74

Liste des symboles et des abréviations

APDL: Ansys Parametric Design Language.

BTPH : Bâtiments, travaux publics, hydrauliques.

CNT : Carbone nano tubes.

E_c : Module d'élasticité.

EDP : Equations dérivées partielles.

HM : Haut module.

HPC : High Performance Computing (Calcule haute performance).

HR : Haute résistance.

HT : Haute ténacité.

[K] : Matrices de rigidité de la structure.

[M] : Matrices de masse de la structure.

MC : Matériaux composites.

MEF : Méthode des éléments finis (Finite Element Analysis).

M_{eff} : Masses effectives.

NC : Nano composites.

NLAD : Capacité adaptative non linéaire.

PAN : Polyacrylnitrique.

PRF : Polymère renforcé des fibres.

PRFA : Polymère renforcé des fibres d'Aramide.

PRFC : Polymère renforcé des fibres de carbone.

PRFV : Polymère renforcé des fibres de verre.

SMART: Splitting morphing adaptive remeshing technique.

TD : Thermodurcissables.

TFC : Tissu de fibres de carbone.

THM : Très haut module.

TP : Thermoplastiques.

ν : Coefficient de poisson.

δ : Densité.

f_i : Fréquences propres de vibration de la structure.

ϕ_i : Modes propres de vibrations.

ω_i : Fréquences naturelles circulaires.

γ_i : Quantité de masse se déplaçant.

Introduction Générale

Introduction générale

1. L'état des lieux

L'application des matériaux composites dans les structures en béton armé (bâtiments, ponts, barrages, autres...), a connu une large diffusion ces dernières années, En effet les éléments structuraux (poutres, poteaux, portiques, voile ...) renforcés par ce type de composite deviennent très résistants aux différentes actions. Cependant dans le domaine de recherche sur les nano-composites se révèle comme une activité de recherche très vastes dont les résultats pourraient élargir le champ d'application des composites. Par rapport aux composites traditionnels, les nano-composites présentent des améliorations aux propriétés mécaniques, thermiques, électrique et chimique [1].

2.Problématique

Les nombreux avantages de l'utilisation des matériaux composites nous font penser qu'ils ne contiennent ni défauts ni problèmes, mais en réalité ils ont aussi des inconvénients notamment le coût élevé, et l'absence de main d'œuvre qualifiée. Ces problèmes sont plus ou moins importants selon la grandeur de projet et le nombre des éléments porteurs qui doit contenir des matériaux composites.

Mais la problématique majeure de l'utilisation des matériaux composites est la durabilité de la surface de frottement entre la matrice des fibres et l'élément structural, la résine qui est un milieu essentiel afin d'assurer la bonne renforcement. Cependant dans des cas où les conditions climatiques sont défavorables (température gradient thermique), la résine (interface) est considérée comme un milieu faible, ce qui entraîne des décollements (délaminage) de la tôle ou le composite (CFRP/fibres).

3.Objectifs

L'objectif de ce travail est d'étudier les effets des nano composites sur les comportements mécaniques des matériaux, vis à vis du modèle analytique pour évaluer l'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement au cisaillement de l'interface matrice/élément d'un matériau nano-composite à partir des propriétés des résines ainsi que les caractéristiques de la liaison d'interface (épaisseur, géométrie et le nombre de couche) entre l'élément de l'ouvrage et le support de composites le tissu des fibres ou bien lamelle.

4. Organisation de mémoire

Dans ce sujet, intitulé " Amélioration de performances mécaniques des résines époxydiques pour le renforcement par nano composites et après une introduction générale, nous nous étaleront dans le chapitre 2, sur l'étude bibliographique en précisant les causes des désordres des ouvrages en béton et les différents types de dégradations. Nous présentons les techniques de renforcement par collage de composites traditionnels et celles appelées "innovantes", les différents types de ruptures d'un élément structural renforcée, ensuite les différentes générations des composites appliqués pour le renforcement et leurs désavantages, tels que le décollement des tissus dus aux faibles performances de la résine (interface). Une attention particulière sera donnée à cette dernière en abordant les différents aspects du nanorenforcement. Une approche numérique aux chapitres 3 et 4 sera détaillée, avec présentation du modèle introduisant les matériaux composites et le type de comportement "anisotropique", avec application de la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel "Ansys 2020" (version académique). Un cas d'étude de pont renforcé (par matériaux composites traditionnels et par insertion des nano-composites) sera présenté. Le Chapitre 5 sera consacré aux résultats et discussions de l'analyse numérique et on termine le manuscrit par une conclusion générale et recommandations.

Chapitre I : Etude Bibliographique

Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1-Dégradations du béton

I.1.1-Introduction

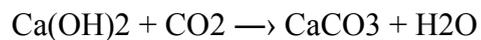
Le béton armé est le matériau le plus utilisé dans le domaine de BTPH. Il peut se dégrader et perdre ses propriétés mécanique et physique sous les influences des causes extérieures différents qui peuvent être liées à des sollicitations d'exploitation ou d'environnement ou bien à leur qualité essentielle de béton. Trouvons quelques pathologies apparentes ou cachées peuvent survenir dans le but d'établir des méthodes de diagnostic relatives et les solutions de maintenance de l'élément de structure destiné.

I.1.2- Les types de dégradations

I.1.2.1 Dégradations d'origine chimique

a) Carbonatation

La carbonatation est un phénomène chimique provient naturellement de vieillissement de quelques matériaux. Dans le cas de béton il se produit une réaction chimique complexe lors de la prise de béton qui se traduit par produisent d'hydroxyde de chaux Ca(OH)_2 . Cette dernière est libérée dans tout le béton.



Le béton perd environ la moitié de l'eau de gâchage après la prise. La présence d'eau provoque des réseaux capillaires dans la masse du béton où peut pénétrer le dioxyde de carbone CO_2 trouvé dans l'air et contamine la basicité des bases alcalines interstitielle du béton conduisant à une chute du Ph du béton de 13 à une valeur avoisinante 9 ou moins dans ce cas la protège de béton contre la carbonatation il faut assurer un enrobage suffisant et confectionner un faible rapport E/C du béton.

b) Corrosion des armatures

La corrosion des aciers d'armatures dans le béton une réaction chimique qui corrode l'acier et diminué leur section initiale et formé le rouille .La vitesse de corrosion de l'acier d'armatures est plus grande en présence de l'eau de mer ,le sel qui contient le chlorure, ce dernier permettent l'amorçage plus rapide de la corrosion en dé passivant la couche superficielle (dissolution de la couche passive ou migration des chlorures à travers le film d'oxyde)[2] ,et aussi le chlorure diminue la résistivité de l'électrolyte qui est le couvert de béton, cette diminution facilite le transport des ions d'un site à l'autre. Les zones riches en oxygène (O^2) sont des milieux favorables pour la propagation de corrosion des armateurs.

La corrosion de l'acier provoque la réduction de la section de l'armature (partiellement et localement ou en totalité). De plus, la réaction chimique de formation de la rouille (mélange d'oxydes et d'hydroxyde de fer) s'effectue avec une expansion (le volume de l'acier devient 3 à 4 fois supérieur). Ce gonflement provoque dans le béton des contraintes d'expansion importantes, supérieures à la résistance à la cohésion du béton. La manifestation visuelle qui en résulte se présente sous forme de fissures en surface qui s'amorcent à partir de l'acier [3].

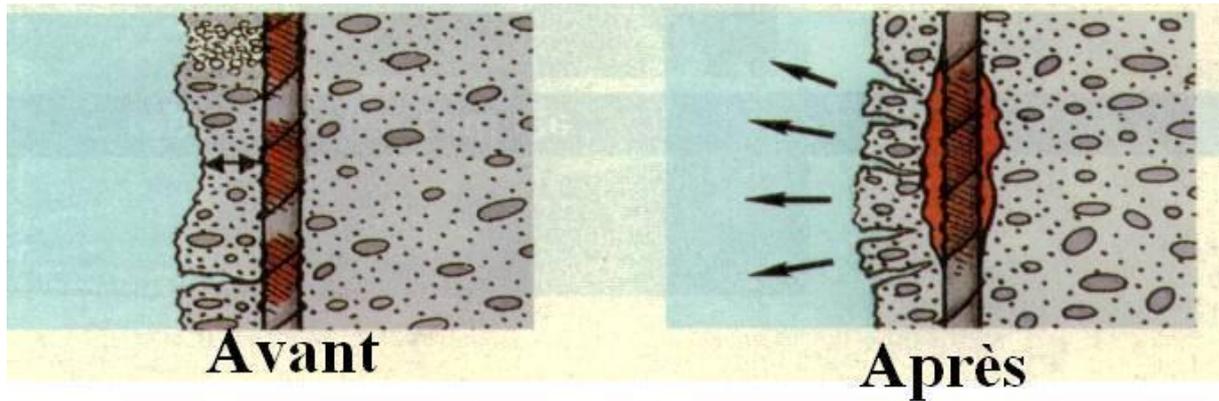


Figure I.1 : Gonflement de l'acier de béton [3].

c) Attaque par les sulfates

Les sulfates peuvent être d'origine naturelle, biologique ou provenir de pollution domestique et industrielle. L'attaque par les sulfates peut détériorer très significativement le béton dans un laps de temps relativement court (10 à 15 ans). Comme l'eau de mer contient des sulfates en solution. On peut aussi les retrouver en solution dans les eaux souterraines, dans les eaux usées industrielles et dans certains sous-produits industriels.

Dans la plupart des sols contiennent des sulfates sous la forme de gypse (généralement entre 0,01% et 0,05 % (sol sec) exprimés en SO_4). Ces concentrations relativement faibles ne sont généralement pas agressives pour le béton [4].

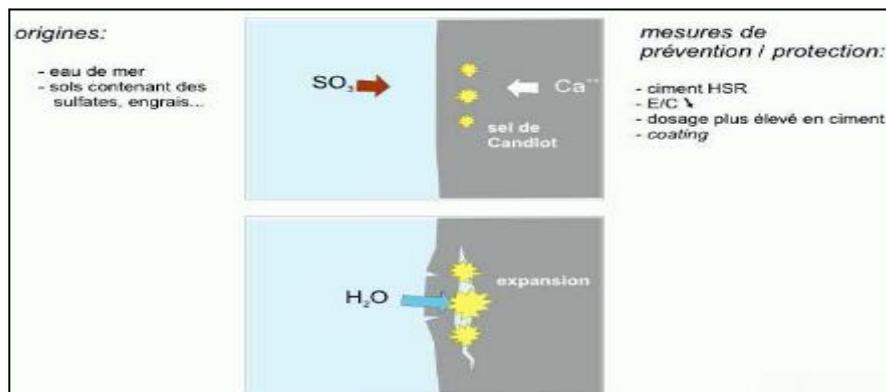


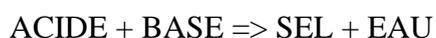
Figure I.2: Procédure de l'attaque des sulfates [3]

d) Attaque par des acides

Les acides sont des matériaux aient un $pH < 7$ il attaquant le béton par dissolution de la portlandite en premier et la C-S-H: Il y a possibilité d'attaque si $pH < 6.5$, une attaque sévère si $pH < 5.5$ et l'attaque très sévère si $pH < 4.5$

Il y a deux types des acides agressifs :

- Inorganiques : carbonique, chlorhydrique, fluorhydrique, nitrique, phosphorique, sulfurique
- Organiques : acétique, citrique, formique, humique, lactique, tannique [2].



Les moyens préventifs contre ces attaques sont :

- Diminuer la teneur en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ du béton par l'utilisation de :
- Un ciment aux laitiers.
- Un ciment alumineux ou pouzzolanique.
- Diminuer la perméabilité par :
- Un mûrissement approprié.
- La diminution du rapport E/C.
- L'utilisation de la fumée de silice.

e) Alkali-réaction

Une autre cause des dégradations chimiques est l'alkali-réaction. Ce phénomène peut se produire si les granulats sont réactifs. L'alkali-réaction regroupe toutes les réactions qui peuvent se produire entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte du ciment hydraté[3].

Les études ont montré que trois conditions doivent être simultanément remplies pour que ces réactions aient lieu :

- Le granulats doit être réactif.
- Un taux d'humidité relativement élevé compris entre 80 et 85%.
- Une grande concentration en alcalins.

L'alkali-réaction est une dégradation interne du béton. L'alkali-réaction est une réaction très lente allant d'un an jusqu'à dix ans (1 à 10 ans) [2].

II.1-2-2 Les dégradations d'origine mécanique

a) Erreurs de conception et d'exploitation

Les différentes erreurs de conception peuvent être résumées comme suit [2] :

- Un tassement.
- Une poussée à vide dans les escaliers.
- Une surcharge que la structure ne peut subir.
- Un manque de joints.
- Un manque d'armatures.

b) Défauts d'exécution

Les défauts d'exécution sont dus généralement à :

- Une mauvaise position des armatures d'aciers.
- Une mauvaise mise en œuvre du béton.
- Un mauvais coffrage.
- Une mauvaise formulation du béton.
- Un recouvrement insuffisant des armatures d'aciers.

c) Les chocs

Le phénomène de choc peut provenir de :

- Les chocs des véhicules sur ponts.
- Les chocs de bateaux sur piles.
- La mauvaise manutention d'éléments préfabriqués.

d) L'abrasion

Le phénomène d'abrasion est dû généralement à :

- Une circulation intense de l'eau (barrages),
- Les charges mécaniques répétées (chaussées, dallage industriel),
- L'action du courant d'eau sur corps immergés ou flottants (piles de ponts, plateforme, etc.).

e) Les fissures

Les différents types de fissures sont :

- Les fissures mécaniques (due à la compression, à la traction, à la flexion ou au cisaillement).
- Les fissures dues au retrait (un retrait plastique, un retrait thermique, etc.).
- Les fissures dues au gel.
- Les fissures dues à la corrosion.

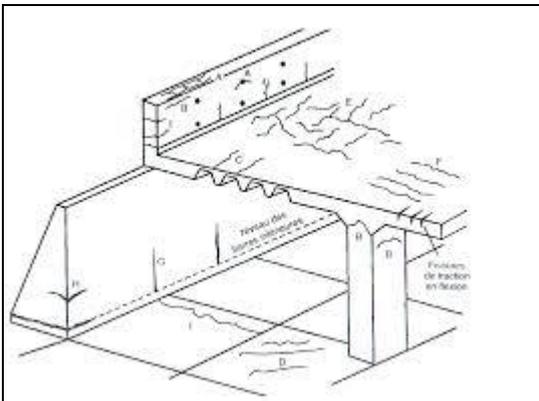


Figure I.3 : Quelques cas de dégradations [5]



Figure I.4 : tassement différentiel [3].

I.1-2-3 Les dégradations d'origine physique

a) Séisme

Un séisme est une manifestation de la tectonique des plaques. Il se traduit en surface par une vibration du sol provenant d'un déplacement brutal de la roche. En surface, un séisme peut dégrader ou détruire des bâtiments, produire des décalages de la surface du sol de part et d'autre des failles. Il peut aussi provoquer des chutes de blocs, une liquéfaction des sols meubles imbibés d'eau, des avalanches ou des raz de marée (tsunamis) [3].

b) Incendie

Le béton a une résistance au feu convenable en cas d'incendie. En 1h la température est de 350°C à une profondeur de 3 cm vis-à-vis de la couche superficielle du béton, et à une profondeur de 7.5 cm elle est de 100°C.

- A 570°C : fissuration des granulats quartzes.

-A 800°C décarbonatation du CaCO₃.

La vaporisation brutale de l'eau implique un éclatement du béton [2].

I.2- Méthodes de diagnostic

II.2.1-Préambule

Le diagnostic d'un ouvrage est le résultat des investigations effectuées pour déterminer l'état de santé et ses conséquences, il est effectué dans le but de connaître les différents cas pathologiques d'un ouvrage ou bien pour déterminer les dégradations des propriétés physique et mécanique d'une structure. En général une analyse diagnostic reste une approximation d'une précision plus ou moins exact où il est rarement dans le cas d'obtenir un ensemble des données exhaustif.

I.2.2-Examen visuel ou morphologique

Dans une analyse diagnostique l'examen visuel est la forme d'investigation la plus rapide. Il y a beaucoup d'informations détaillées qui peuvent être déduire pour donner des causes préliminaires de l'état de l'ouvrage et de permettre de connaître l'ensemble des tests convenables ultérieurement tout ça peut être l'obtenir à partir d'inspection visuelle dans de nombreux cas.

I.2.3-Essais sur le béton

I.2.3.1-Essais destructifs :

-Le carottage

Le carottage est un prélèvement d'échantillons de béton d'un ouvrage pour pouvoir faire des essais au laboratoire dans le but de détermination les propriétés mécaniques et physiques de béton et obtenir les renseignements relatifs au l'état de l'ouvrage étudié



Figure I.5 : Le carottage de béton [3]

Le prélèvement de carotte a comme but de faire des analyses en laboratoire. Ces examens peuvent être demandés en vue d'examen pétrographique pour identification des agrégats, de détériorations des agrégats, homogénéité du béton, profondeur décarbonations, répartition des fissures. En plus de l'analyse chimique, essais physico – mécanique, densité, résistance à la compression et module d'élasticité.

I.2.3.2-Essais non destructifs :

a) Le scléromètre

L'essai au scléromètre consiste à projeter une masse sur la surface du béton avec une énergie initiale constante. La mesure de la dureté au choc permet d'évaluer la résistance d'un béton de manière non destructive. Cette méthode est intéressante en raison de sa simplicité ; elle permet de faire rapidement des contrôles de régularité des bétons d'un ouvrage. La méthode du scléromètre constitue une voie directe utilisée pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de la surface de l'élément en béton [3].



Figure I.6: Scléromètre numérique [6]

b) Essai de résistance à la pénétration :

La sonde de Windsor est généralement reconnue comme le meilleur moyen pour exécuter l'essai de résistance à la pénétration. La profondeur de la pénétration fournit une indication de la résistance du béton à la compression [3].



Figure I.7 : Sonde de Windsor [8]

c) L'auscultation dynamique :

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée [7].

d) Fissuromètre

Le fissuromètre mécanique comprend un corps télescopique et deux ancrages à rotule. Les ancrages sont placés de part et d'autre du joint ou de la fissure, puis le corps du fissuromètre est fixé aux ancrages. Les lectures sont obtenues au moyen d'un comparateur [9]. Leurs applications sont :

- Fissures sur les bâtiments à suivre pendant les travaux alentours
- Joints structurels dans les barrage-poids et barrages-voûtes
- Déplacements de caissons et de piliers (digues et ponts)



Figure I.8 : Le fissuromètre numérique [3]

e) Extensomètre

Un extensomètre est un appareil qui permet de mesurer la déformation linéaire d'un élément structurelle.

f) Hygromètre

Hygromètre est un humidimètre pour l'évaluation de l'humidité, en surface de l'élément et en profondeur de façon non destructive par une méthode basée sur la radiofréquence.

I.3- Méthodes de réparation et renforcement des structures en béton

I.3.1- Introduction

Les causes qui conduisent à un renfort structurel sont aussi nombreuses que le nombre de structures elles-mêmes, chaque cas doit être considéré comme un cas particulier [10]. Dans la majorité des cas, les éléments structurels en béton armé présentent une durabilité plus de 70ans, donc en général elles méritent d'être protégées, même si les exigences fonctionnelles des ouvrages sont développées avec le temps.

I.3.2- Le chemisage

Le procédé classique dont l'efficacité a été largement vérifiée par l'expérience, il consiste à chemiser l'élément en augmentant sa section par mise en œuvre d'une épaisseur de béton sur tout le périmètre de l'élément primitif. L'utilisation d'un micro-béton, auto compactable, pour remplir les interstices sans mode de vibration, peut s'avérer essentielle.

La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy [11].

a-Mise en place des armatures complémentaires

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, ou des systèmes explicites de fixation (cheville, tiges collées), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celle-ci devra être effectuée, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée [12].

b-Protection des armatures :

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements, pour un environnement donné.

Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement. On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation [13].

c-Adhérence entre les deux bétons

L'adhérence représente la résistance au cisaillement, en l'absence d'un effort de compression normal sur cette interface et d'une armature de couture qui la traverserait. Cette adhérence est due essentiellement à une liaison chimique entre le béton existant et le nouveau béton. La valeur maximale de l'adhérence est atteinte pour des valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02 mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm [12].

d-Réfection des bétons :

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre d'un mortier riche. Ce dernier doit respecter les critères :

- De la tenue d'aplomb de l'élément.
- D'une résistance mécanique supérieure ou égale au béton support.
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,
- D'un coefficient de dilatation thermique équivalent au béton support.
- D'une bonne protection d'aciers.

Ces critères sont assurés par l'utilisation de mortiers à base de résine pour améliorer les propriétés de l'apport, surtout lorsqu'il réagit dans la partie de l'interface où il y a plusieurs phénomènes tels que : l'influence du retrait en termes de glissement sur l'interface du béton initial et le béton nouveau [13].

***Avantages du chemisage en béton armé**

- Technique peu coûteuse du fait des matériaux utilisés.
- Main d'œuvre peu qualifiée [14].

***Inconvénients du chemisage en béton armé**

- Augmentation considérable des sections donc du poids de la structure.
- Les éléments sont plus encombrants et moins esthétiques.
- Nécessité de mettre hors service l'ouvrage à renforcer pendant la durée des travaux qui est généralement longue.
- Transport des matériaux.
- Nécessité de coffrages.
- Mise en œuvre souvent difficile [14].

I.3.3- Tôles d'acier collées

Ce type de renforcement consiste à pallier les insuffisances locales ou globales des structures en béton par des tôles d'acier, collées en surface du béton. Cette surface de béton doit subir avant tout, une préparation soignée ayant pour objet d'éliminer de la surface toutes les parties peu adhérentes et de supprimer les imperfections locales afin de la rendre la plus plane possible [2].

Il importe d'expliquer plusieurs termes concernant les produits de tôle d'acier, puisqu'ils influencent l'épaisseur du produit livré au chantier [15].

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients des tôles collée [16]

Avantages	Inconvénients
- il n'exige que des interventions mineures sur la structure	- sensibilité de l'acier à l'oxydation (il demande donc une protection et un entretien soigné) ;
- il est d'un emploi souple	- impossibilité de mobilisation de toute la résistance en traction des tôles, même sous faible épaisseur (solllicitation le long d'une face) ;
- les renforts sont peu encombrants.	- nécessité d'une préparation spécifique de la surface à traiter (la raideur des tôles nécessite une surface parfaitement plane pour assurer l'uniformité de l'épaisseur de l'adhésif)
	- nécessité d'un collage sous pression (vérins), pour assurer une adhésion suffisante et éviter les bulles d'air dans la couche de résine de collage ;

I.3.4- Béton projeté

La méthode de renforcement par béton projeté est destinée aux les cas de dégradation important dans les surfaces de l'ouvrage, elle est basée sur l'augmentation de volume de l'élément par un béton ayant des caractéristiques spécifiques plus que leur homogénéité est très élevée pour permettre de le lancer à une grande vitesse à l'aide d'un compresseur d'air [17].

Il existe deux techniques principales de projection :

- **Procédé par voie sèche** : L'introduction de l'eau est au niveau de la lance [18].

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse (eau- fines -ciment) que pour les gros granulats [12]. Cette méthode permet d'atteindre de grandes distances de projection par rapport à la voie humide. [19].

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients de projection par voie sèche

Avantages de projection par voie sèche :	Inconvénients de la projection par voie sèche :
<ul style="list-style-type: none"> ❖ Possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm) ❖ Un dosage relativement faible en ciment. ❖ Un faible rapport E/C. ❖ Un compactage énergétique ❖ Une bonne adhérence sur le support. ❖ Une pénétration en grande profondeur dans les pores. ❖ Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement. ❖ Production de poussières.

- **Procédé par voie humide(mouillée)** : l'introduction de l'eau et au niveau de la mélange de béton [18].

La vitesse de transport et de projection est inférieure à 1m/s, nettement plus faible que dans le cas d'une projection à voie sèche. Le mélange ayant sa composition définitive au passage de la lance, il n'y a pas de surdosage dans la zone de contact avec la surface d'application [12].

Tableau I.3: Avantages et inconvénients de projection par voie humide

Avantages de projection par voie humide(mouillée)	Inconvénients de la projection par voie humide(mouillée) :
<ul style="list-style-type: none"> ❖ - Composition uniforme de la couche projetée ❖ - Pas de rebondissement violent. ❖ - Pas de production de poussières 	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire. ❖ Compactage faible. ❖ Nécessité d'accélérateurs de prise

Dans les deux cas, on projette le béton contre la surface à bétonner à l'aide d'un jet d'air sous pression. Dans le procédé par voie sèche, l'eau est ajoutée en bout de lance alors que dans le procédé par voie humide, elle est mélangée en totalité lors de la fabrication du béton en centrale. La projection pneumatique est une technique de mise en place. Elle est très utilisée pour la réalisation de travaux miniers et souterrains, pour la réparation des ouvrages détériorés, stabilité de talus, etc. [17]

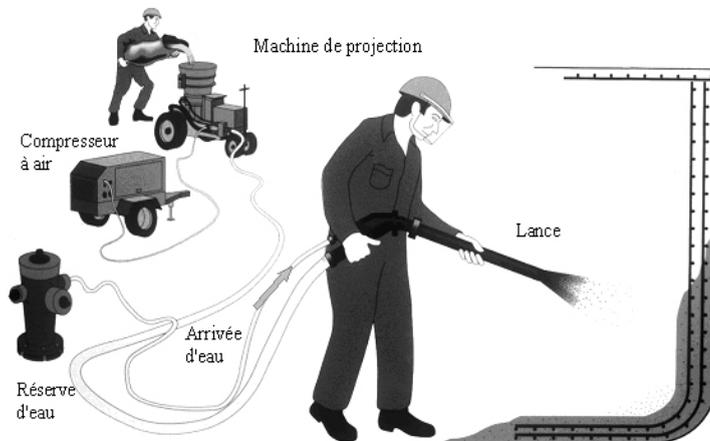


Figure I.9 : Projection par voie sèche [17]

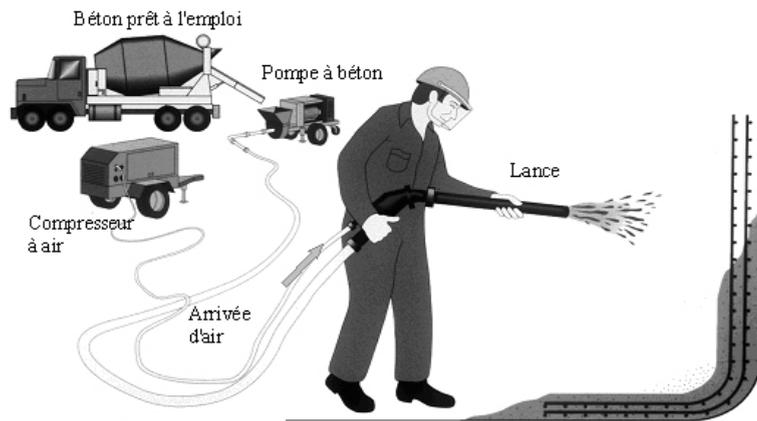


Figure I.10 : Projection par voie humide [17].

I.3.5- Précontrainte additionnelle

Cette technique consiste à renforcer une structure à l'aide de câbles de précontrainte ou de torons gainés graissés généralement disposés à l'extérieur du béton. La précontrainte additionnelle va introduire dans la structure des sollicitations complémentaires, qui vont compenser les défauts de dimensionnement ou de conception ou des efforts supplémentaires, que doit supporter la structure suite à des modifications des conditions de chargement ou d'utilisation [20].

I.3.6- Injection de résine dans les fissures

Les éléments en béton, endommagés dont les fissures sont stables et qui ont une largeur comprise entre 0.2 mm et 2 mm peuvent être réparés par la technique d'injection de résine. Il est bien entendu que le béton des zones fissurées n'est ni disloqué ni écrasé. Les éléments dont les fissures dépassent 2 mm de large peuvent être réparés par injection de mortier époxydique. Les travaux d'injection se font en deux étapes : la préparation des fissures, et l'injection proprement dite [21].

I.3.7- Renforcement par tissu de fibres de carbone (TFC)

a- Définition du système TFC

Le procédé TFC est un procédé breveté de renforcement structurel par collage d'armatures additionnelles à base de fibres de carbone. Le procédé est basé sur le principe d'un placage de matériau résistant aux efforts de traction et judicieusement collé sur les zones tendues de la pièce à renforcer pour en augmenter les performances de fonctionnement. Le procédé TFC a essentiellement un rôle de renforcement structurel aux efforts engendrés par les effets de flexion comme d'efforts tranchants [13].

Le TFC est un composite à base de fibres de carbone matricées dans un liant synthétique appliqué à froid dans le but d'être intégré par adhérence au support pour former le complément d'armature de renforcement désiré. Le composite ainsi obtenu rivalise par ses caractéristiques mécaniques avec les meilleurs aciers sans avoir les inconvénients des effets de la corrosion.

Les avantages de fabriquer le composite directement sur le support sont de pouvoir mouler la forme exacte de la pièce à renforcer, de ne pas manier de plaques lourdes ou encombrantes, de ne pas avoir d'autre interface de collage avec le support que la matrice même du composite. Par sa simplicité de mise en œuvre, l'absence de pression à exercer durant la pose et le durcissement de la colle, fait du TFC est un système de renforcement économique [22].

b-Composite TFC

On appelle composite TFC, l'ensemble du tissu matricé dans la résine de synthèse. Le composite obtenu par fabrication in situ est constitué d'environ 40% de tissu et 60% de résine. Ces proportions peuvent varier à l'exécution dans une fourchette de plus ou moins 7% selon les conditions d'application sur le chantier (température ambiante, surface spécifique du support etc.) [13].

c-Cas d'utilisation Domaine d'application

L'application des composite TFC dans le domaine de génie civil est presque dans tous les ouvrage en béton armé et en tous les éléments structuraux, en dit poutres, voiles, poteaux, dalle, etc.

Les cas d'utiliser le TFC sont les suivants :

- Cas de dommages accidentels dans l'élément structural.
- Renforcement difficile d'accès.
- Corrosion avec réduction des sections d'aciers.
- Réparation d'ouvrages endommagés
- Défaut de positionnement.
- Réduction de la déformation surtout la flèche et les fissurations.
- Ferrailage insuffisant ou bien faible.



Figure I.11: poteau confiné par TFC [3].



Figure I.12: poutre renforcée par TFC [3].

d-Avantages et inconvénients de renforcement par TFC

Les avantages et les inconvénients du renforcement par le composite TFC sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients de renforcement par TFC [23].

Avantages du TFC	Inconvénients du TFC
<ul style="list-style-type: none"> - Facilité de transports et de manipulation. - Facilité de coupure et de la mise en œuvre dans les surfaces non développées. - Adaptation aux supports. - Possibilité d'application à multicouche. - Facilité de contrôle. - Immunité contre la corrosion. - Une légèreté 5 fois plus que l'acier. - Une résistance 10 fois plus que les platines. - Une grande flexibilité avec une faible épaisseur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût relativement élevé du produit de base jusqu'à 10 fois le coût de l'acier, pour une masse identique). -Connaissances limitées sur leurs propriétés à long terme, notamment en ce qui concerne l'adhérence à l'interface béton composite. - Le TFC ne résiste pas au feu. - Manque de ductilité.

I.3.8. - Conclusion

On conclut que le renforcement par les composites TFC aient un grand avantage de flexibilité en s'adaptant aux formes des éléments renforcés les plus complexes et pour leurs propriétés mécaniques et physiques très légères par rapport aux autres matériaux comme l'acier, plus que leur facilité de mise en œuvre sur site. On peut dire que ces avantages permettent de choisir les matériaux composites comme méthode de réparation et renforcement des ouvrages en béton, l'application de TFC ou lamelles en PRFC (polymère renforcé en fibres de carbone) est une option intéressante comme une méthode de renforcement conventionnelle. Pour ce but le choix de réparation ou renforcement d'un ouvrage par matériaux composites PRFC (Polymère Renforcé en Fibre de Carbone) est considéré comme une étude intéressante.

I.4- Matériaux Composites

I.4.1- Introduction

Le développement des matériaux composites dans le secteur du Génie Civil a pour objectifs : D'une part d'ouvrir de nouveaux champs d'application (physique, mécanique, tenue à l'environnement, comportement sous sollicitations extrêmes) et d'améliorer le cycle de vie pour s'intégrer dans le contexte du développement durable (durée de vie, recyclabilité, coût énergétique), et d'autre part de s'adapter aux exigences de renforcement et de protection des ouvrages existants [24].

Dans le domaine du génie civil, les matériaux composites sont utilisés pour le renforcement et la réhabilitation d'éléments structuraux en béton armé, tels que les poutres, les dalles, les colonnes et les murs. Les premières recherches sur l'application de ce nouveau matériau destinées aux ouvrages de génie civil datent de 1980, bien que ce soit plutôt vers 1990 que le matériau est utilisé, d'abord sur une base expérimentale, puis progressivement sur une base commerciale [10].

I.4.2- Lecture statistiques des réparations par matériaux composites

L'intégration des matériaux composites dans le domaine du génie civil s'est avérée une source de plusieurs nouvelles applications. Les recherches récentes sur les composites ont amené les ingénieurs à s'intéresser à l'utilisation de ces nouveaux matériaux dans le domaine de la construction. Depuis peu, on retrouve des cas pratiques de leur application dans différents ouvrages de génie civil. [3].

Tableau I.5: Comparaison entre composites et acier

Critères	Avec les composites	Avec l'acier
Poids propre	Bas	Elevé
Résistance en traction	Très élevée	Elevée
Epaisseur	Très basse	Basse
Corrosion	Non	Oui
Longueur des plaques	Illimitée	Limitée
Manutention	Facile, flexible	Difficile, rigide
Capacité de chargement	Direction longitudinale	Toute direction
Coût du matériau	Elevé	Bas
Coût des installations	Bas	Elevé
Application	Pas d'équipement	Appareil de levage

La première utilisation importante de matériaux composites dans le renforcement des structures remonte à 1991, en Suisse, pour la réhabilitation du pont d'Ibach. Ce pont est constitué d'une poutre caisson alors que des plaques de composites ont été appliquées sur la surface tendue. 6,2 kg de feuilles de composite de 2 mm d'épaisseur et de 150 mm de largeur ont remplacé 175 kg d'acier. Le pont de Kattenbusch, en Allemagne, est aussi constitué de poutres caissons continues sur 11 portées. L'effet des gradients de température a amené une fissuration prématurée au niveau de certains joints.

Un renforcement avec des plaques de fibre de verre a été utilisé. L'utilisation des matériaux composites pour la réhabilitation et le renforcement devient une solution préconisant un remplacement tout aussi efficace que l'acier. À titre comparatif, le tableau 3.1 donne les avantages des composites sur l'acier [3]

Étant donné ces nombreux avantages, les matériaux composites représentent un très bon investissement en ce qui a trait au renforcement et à la réhabilitation des structures en béton armé. Les seuls inconvénients sont le coût du matériau et le manque de connaissances autant sur son comportement à long terme sur les structures que sur les techniques de conception. Cependant, le coût des matériaux ne représente généralement que 20% du coût total pour une construction conventionnelle. En éliminant les coûts se rattachant à la main-d'œuvre et à l'équipement, les matériaux composites devraient très bien concurrencer les méthodes traditionnelles de réparation. Cependant, les proportions du coût du matériel sur le coût de la main-d'œuvre seraient grandement modifiées. [3]

I.4.3- Les matériaux composites et les résines appliquées pour le renforcement

I.4.3.1- Introduction

Les matériaux composites peuvent être définis comme assemblage de deux ou plusieurs matériaux dont la combinaison aboutit à la naissance d'un nouveau matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Leurs principaux avantages en comparaison avec les matériaux de construction traditionnels sont : leur haute résistance mécanique et chimique, grande rigidité, liberté de forme, légèreté, ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés, Ils offrent une meilleure isolation thermique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau (I.6).

Dans un sens plus restrictif, un matériau composite utilisé dans la réparation des structures est par définition, toute matière première comportant un renfort et une matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison. Le renfort assure la résistance et la rigidité du matériau, la matrice maintient les éléments de renfort dans leurs dispositions, assure le transfert des charges au renfort et donne au matériau sa forme désirée. Le renfort peut être sous forme de fibres ou de particules, on ne traitera dans ce travail que ce qui concerne les matériaux à base de fibres.

Les principaux constituants des matériaux composites reçoivent des additifs ou charges pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice [3].

Tableau I.6: Exemples de matériaux composites

Type de composite	Constituants	Domain
1/Composites m a t r i c organique	-Résine/fibre cellulosique -Résine /copeaux -Résine / tissus -Elastomère	-Imprimerie -bâtiment -toitures -Automobile
2/composites à matrice minérale	Ciment /sable /granulats Carbone / fibres	-Génie civil -aviation -espace
3/ Composites à matrice Métallique	Aluminium /fibres de bore Aluminium /fibres de carbone	-aérospatial

I.4.3.2-Les types des matériaux composites

Toute matière première comportant des charges peut être appelée au sens général composite. Par définition, un matériau composite est formé d'éléments très différents. C'est le résultat du mélange d'au moins deux composantes, différentes par leur nature, leur forme et leur fonction, et dont les performances globales sont supérieures à celles des éléments le constituant. Les matériaux composites sont utilisés par l'homme depuis des millénaires dans le domaine de la construction. Le pisé de paille et d'argile est un des plus anciens matériaux dont l'idée première est exactement celle des composites : exploiter la résistance à la rupture des fibres, en laissant à une matrice de « qualité mécanique » inférieure le soin de maintenir ces fibres dans la forme voulue [25].

Depuis des millénaires, l'homme a cherché à se protéger dans un bâtiment. Pendant des siècles, sa sécurité dépendait de protections dures, massives donc lourdes. La notion de constructions légères et souples ne date que de quelques décennies [10]

En général les constituants principaux d'un matériau composite sont : les fibres et la matrice.

I.4.3.2.1. Les fibres

Les fibres (renforts) contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme Allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif [26]. Les propriétés des composites sont principalement influencées par le choix des fibres [27]. Parmi les fibres les plus connues en génie civil, on peut citer : le carbone (haut module élastique et résistances mécaniques importantes à la fatigue), le verre (résistances moyennes, très utilisé pour renforcer les bétons) et l'aramide (de haute résistance à la traction, utilisée en câbles de hautes performances) [10].

a- Les fibres de Carbone :

Sont largement utilisées depuis maintenant plus de 30 ans, et leur coût ne cesse de diminuer même s'il reste élevé par rapport aux autres fibres [28]. Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur. Actuellement, les fibres précurseur utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. On peut citer quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J [29]

- Différentes classes des fibres de carbone :

Selon la température de combustion on distingue deux types de fibres : fibres haute résistance (HR) pour une combustion de 1000 à 1500 °C, et les fibres haute module (HM) pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C [30].

- Propriétés mécaniques des fibres de carbone :

Les fibres de carbone ont un haut module d'élasticité, de 200 à 800 GPa. L'allongement ultime est de 0,3 à 2,5 %. Les fibres de carbone n'absorbent pas l'eau et elles résistent à plusieurs solutions chimiques. Elles présentent une résistance excellente à la fatigue, et une faible relaxation comparée à celle des aciers extensibles précontraints. La fibre de carbone est un conducteur électrique et, par conséquent, peut donner la corrosion galvanique si elle est en contact direct avec l'acier. Il faut signaler également le mauvais comportement au choc et à l'abrasion des stratifiés renforcés par des fibres de carbone. Les fibres de carbone se différencient par le taux de carbone plus ou moins élevé qui modifie les allongements et les contraintes à la rupture et les modules d'élasticité. On trouvera des fibres dites « à haute résistance » HR et des fibres « à haut module » HM ou même « à très haut module » THM, et des fibres intermédiaires [31].

b- Les fibres de Verre : Les fibres de verre sont moins chères que les fibres de carbone et les fibres d'aramide. Par conséquent, les composites en fibres de verre sont devenus la solution la plus utilisée dans plusieurs applications, tel que le génie civil, l'industrie des bateaux et d'automobiles. Les modules d'élasticité des fibres sont de 70 à 85 GPa avec un allongement ultime de 2 à 5 % selon la qualité. Par contre les fibres de verre peuvent avoir des problèmes de relaxation. Elles sont aussi sensibles à l'humidité, mais avec le choix correct de matrice les fibres sont protégées.

c- Les fibres d'Aramide :

Appelés aussi polyamide aromatique, une marque bien connue des fibres d'aramide est « kevlar » mais il existe d'autres marques aussi tel que « Twaron », « Technora », et « SVM ». Les modules d'élasticité de ces fibres sont de 70 à 200 GPa avec une haute énergie de fracture et un allongement ultime de 1,5 à 5 % selon la qualité. Les fibres d'aramide sont sensibles aux températures élevées, à l'humidité et aux radiations « ultraviolet » et par conséquent, ne sont pas largement utilisées dans les applications de génie civil. Plus loin, les fibres d'aramide ont des problèmes avec la relaxation et la corrosion, mais avec une bonne résistance au choc et à la fatigue. [26]

I.4.3.2.2. Les matrices

La matrice fournit le mécanisme nécessaire au transfert de la charge de part et d'autre des fibres. Elle protège également les fibres des risques d'abrasion et des autres attaques environnementales et chimiques [32].

Les matrices ont pour rôle de transférer les sollicitations aux fibres et de les maintenir en position, elles doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres, leur concentration massique doit être relativement faible de manière à conserver aux composites leurs caractéristiques mécaniques élevées. Les matrices utilisées dans la fabrication des composites peuvent être minérales ou organiques, actuellement 99% des matrices utilisées sont des matrices organiques. La matrice est 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 [3].

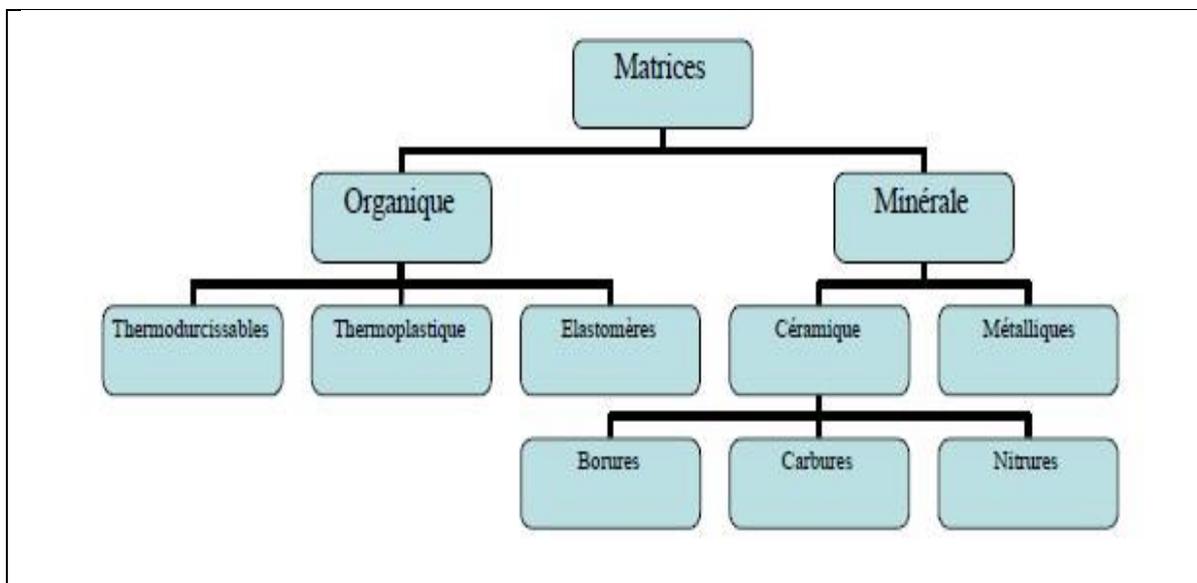


Figure I.13: Différents types de matrices [2].

- Différentes catégories des matrices :

Dans un matériau composite, le terme matrice désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. Le premier rôle de la matrice est de maintenir les renforts dans une forme compacte et de donner la forme voulue au produit final. Elle sert également à protéger les fibres contre l'abrasion et un environnement agressif, contrôler le fini de surface et assurer le transfert de charges entre les fibres.

Le solide formant la matrice peut être d'origine métallique, céramique ou polymère. La performance générale du composite (matrice/renfort) est très dépendante du choix de la matrice et de leur nature [33].

I.4.3.3- Propriétés mécaniques des composites

Les propriétés mécaniques des matériaux composites varient considérablement. Ces propriétés dépendent des fibres contenues dans le composite (type, quantité et direction), de la matrice utilisée, et du rapport volume-fibre, c'est à dire le ratio du volume des fibres par rapport au volume total du composite. Elles sont aussi affectées par le volume ou la dimension du composite lui-même [35].

En général, les composites de fibres de carbone sont plus solides et plus rigides que les composites de fibres de verre [32]. Le Tableau II.7 résume les principales propriétés mécaniques des matériaux composites couramment utilisés en génie civil.

Tableau I.7 : Propriétés mécaniques des composites

Filament	Diamètre (µm)	Densité (kg/l)	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Température de fusion (°C)
Verre E	3 à 30	2,54	3 400	73 000	4,5	850
Verre D	3 à 30	2,14	2 500	55 000	4,5	–
Verre R	3 à 30	2,48	4 400	86 000	5,2	990
Carbone HR	8	1,78	3 500	200 000	1	2 500
Carbone HM	8	1,8	2 200	400 000	0,5	2 500
Aramide HR	12	1,45	3 100	70 000	4	480
Aramide HM	12	1,45	3 100	130 000	2	480

I.4.3.4- Comparaison des performances pour le renforcement des structures

Les composites polymère renforcé de fibres de carbone (carbon-fibre-reinforced polymer) «PRFC» ont des propriétés supérieures que celles des composites polymère renforcé de fibres de verre (glass-fibre-reinforced polymer) «PRFV», mais ces dernières ont l'avantage d'être moins cher. Le Tableau (II.8) donne une comparaison qualitative des différents composites «PRF» couramment utilisés pour les applications de renforcement des structures en béton armé.

Tableau I.8 : Comparaison qualitative entre Verre-E, Carbone-H.T et Aramide[37]

Critères	Tissus de composites en:		
	Fibres de verre-E	Fibres de carbone	Fibres d'aramide
Force de traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Force de compression	Bonne	Très bonne	Inadéquante
Module de Young	Adéquat	Très bon	Bon
Comportement à long terme	Adéquat	Très bon	Bon
Comportement à la fatigue	Adéquat	Excellent	Bon
Densité apparente	Adéquante	Bonne	Excellent
Résistance à l'alcaline	Inadéquante	Très bonne	Bonne

I.4.4- Les résines pour les matériaux composites

I.4.4.1-1. Introduction

Les résines sont des polymères modifiés par différents additifs et adjuvants. Les résines sont livrées sous formes de solutions, sous forme de polymères non réticulés en suspension dans des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules pré polymérisées. Sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes de pré polymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnelle [3].

I.4.4.2-Les résines

Il existe deux types principaux de Résine :

a-Résine thermodurcissable (TD) : polymère transformée en un produit essentiellement infusible et insoluble après traitement thermique (chaleur, radiation) ou physicochimique (catalyse, durcisseur). La transformation est irréversible.

b-Résine thermoplastique (TP) : polymère pouvant être alternativement ramollie par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité. La transformation est réversible [10].

I.4.4.2.1-Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet après polymérisation par apport de chaleur, ces résines développent une structure géométrique qui ne peut être détruite que par un apport très important d'énergie d'où leur propriétés mécaniques et thermomécaniques très élevées par rapport aux résines thermoplastiques.[03]. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la composition des matériaux composites sont :

a- Les résines Polyesters non saturés

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 dégel, puis à l'état 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.

***Les avantages de ces résines 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.).

***Leurs inconvénients :**

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

b- Epoxydes

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 aérospatial, missiles, etc....).

Toute fois pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et sur tout de recuisons très longues, correspondant à des températures relativement élevées de l'ordre de 100°C [03].

***Ses avantages :**

- 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.

***Leurs inconvénients sont :**

- Coût élevé.
- Temps de polymérisation long.
- Vieillessement sous température.
 - Sensibilité à l'humidité et aux rayons ultra-violet.
- Nécessite de prendre des précautions lors de la mise en œuvre

Tableau I.9: Caractéristiques mécaniques des résines époxy [38]

Résistance à la traction (MPa)	50 à 80
Module de traction..... (GPa)	3 à 10
Allongement à la rupture (%)	1 à 1,5
Résistance à la compression (MPa)	140 à 150
Énergie de rupture au choc..... (kJ/m ²)	7 à 10

I.4.4.2.2-Les résines thermoplastiques

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

La structure de ces résines sa 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 phénylène : une résistance à l'hydrolyse.
- Polyoxyméthylènes : une bonne tenue à la fatigue.
- Polysulfurés : 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, toute fois ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques, et thermomécaniques faibles [3].

Tableau I.10: comparaison des matrices TD et TP.

TP(thermoplastiques)	TD(thermodurcissables)	Matrices
Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser	Etat de base
Illimité	Réduit	Stockage
Difficile	Aisée	Mouillabilité des renforts
Chauffage+refroidissement	Chauffage continue	Moulage
Court	Long(polymérisation)	Cycle
Assesbonne	Limitée	Tenue au choc
Réduite	Meilleure	Tenue thermique
Recyclables	Perdus ou utilisés en charges	Chutes et déchets
Propreté	Emanations de solvants	Conditions de travail

I.4.5- Conclusion

En génie civil, les résines thermodurcissables (thermosets) sont utilisées presque exclusivement, telles que les matrices vinylesters, polyesters et époxy [35]. Les matériaux composites présentent des avantages tels que [3] :

- 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 PRF (Polymère Renforcé en Fibre) est inférieur de 10% au poids des platines d'acier.
- 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 PRF sont beaucoup plus concluants que ces derniers.
- Facilité de préparation de surfaces
- Le 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 leurs 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 comparativement 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 plats de précontrainte des composites est appliquée afin de compenser la perte de tension dans l'élément structurel et réduire ainsi les fissures.

I.5- Les Nano-Composites

I.5.1. Introduction

L'utilisation des matériaux composites dans le domaine de génie civil est devenue courante depuis les dernières années, où les nombreux matériaux composites remplacent progressivement certains matériaux traditionnels. Ce remplacement nous permet d'améliorer les caractéristiques des matériaux, nous disons les caractéristiques mécaniques comme la résistance à la compression mais à la traction surtout et l'optimisation de modules d'élasticité, et les caractéristiques chimiques comme la résistance à la corrosion, ce qu'on appelle la première et de deuxième génération des matériaux composites. D'autre part les nano composites qui sont les 3ème génération des matériaux composites, ils ont suscité un grand intérêt dans le domaine de génie civil car ils présentent une augmentation exceptionnelle dans les propriétés des résines (interface) par rapport à la première et de deuxième génération des matériaux composites (composite classique).

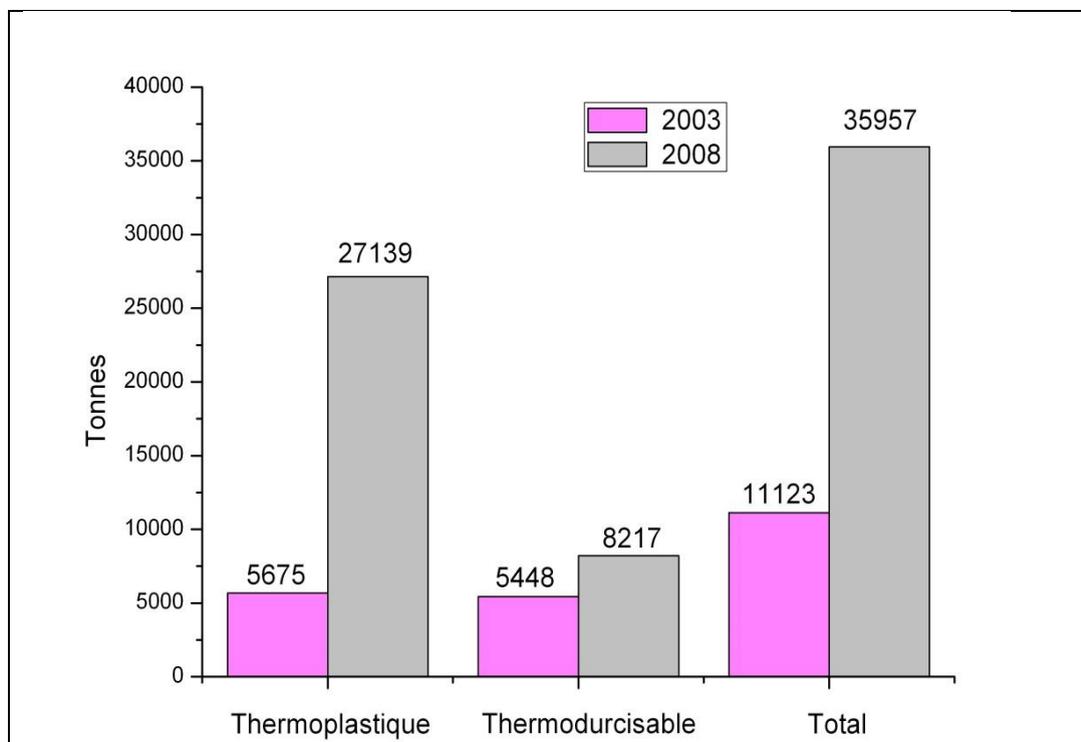


Figure I.14 : Production mondiale (en tonnes) de nano-composites polymères [56].

I.5.2. Les Composites (Classique) de fibres de carbone à matrice polymère

Les composites (fibres de carbone) / (résines) constituent des composites à très hautes performances. Leur résistance à la rupture, leur rigidité, leur résistance à la fatigue et à la corrosion sont plusieurs fois supérieures à celles des aciers et des alliages légers, tandis que, simultanément, leur densité est deux à cinq fois plus faible. De plus, leur coefficient de dilatation est pratiquement négligeable et très inférieur à celui des métaux.

Les avantages de l'utilisation de ces renforts sont nombreux. On peut citer les avantages suivants :

- Grande résistance à la fatigue ;
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur ;
- Insensibles aux produits chimiques comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole ;
- Bonne résistance à la corrosion ;
- Vitesse de fissuration faible et constante ;
- Meilleure répartition des contraintes ;
- Meilleure résistance au niveau des points d'assemblage ;
- Meilleure résistance aux impacts ;
- Poids moins élevé que des panneaux métalliques de résistance mécanique équivalente [39].

I.5.3. Les nano-composites à matrice polymère et renfort (CNT) :

Pour la fabrication de nano-composites, les nanotubes des carbones sont principalement associés à des polymères thermodurcissables. C'est ainsi qu'en 1994, Ajayan fut le pionnier de la fabrication de nano-composites à matrice polymère renforcée par des CNTS afin d'améliorer les propriétés, notamment mécaniques du nano-composite [40]. Il utilisa une résine époxy dans laquelle les CNTS ont été dispersés par ultrasons. Depuis, de nombreuses avancées ont été faites, et notamment du point de vue de la dispersion des CNTS, ou bien au niveau de l'interface matrice/renfort [41]. L'utilisation de matrice de type polymère thermoplastique fait également l'objet de travaux de recherches [42]. Cependant, ces études demeurent limitées par rapport aux thermodurcissables, notamment du fait de leurs champs d'applications moins vastes. La particularité des nano-composites polymère-CNT réside dans la finalité multifonctionnelle du matériau obtenu, du fait des propriétés intrinsèques des CNTs. En effet, l'ajout de CNTs dans une matrice polymère lui confère en plus de la rigidité mécanique, des augmentations significatives de conductivités électrique et thermique.

I.5.4. Différence entre les Nano-composites et les composites classiques :

Les nano-composites sont également composés d'une matrice contenant des charges. La différence par rapport aux matériaux composites classiques provient du fait que les charges possèdent au moins une dimension de l'ordre du nanomètre. Ces nanocharges peuvent être monodimensionnelles (NTC), bidimensionnelles (argiles en feuillets) ou encore tridimensionnelles (Nano-sphères). Bien que l'ajout de charges microscopiques dans une matrice permette d'améliorer quelques propriétés, cela se fait au détriment d'autres propriétés. Les nano-composites présentent souvent des propriétés similaires aux composites classiques mais pour des teneurs en charges jusque 20 fois inférieures, limitant ainsi par la même occasion la dégradation des propriétés provoquée par l'ajout de charges macroscopiques [43].

Les (NC) présentent plusieurs intérêts par rapport aux composites classiques. Un premier intérêt réside dans la surface interfaciale entre les nanocharges et la matrice. Pour un poids donné, les nanoparticules présentent une surface d'échange beaucoup plus importante que les particules de taille microscopique. Les (NC) ont donc de meilleures propriétés comparativement aux composites classiques, comme par exemple une meilleure répartition des contraintes à l'intérieur de la matrice [44]

I. 5.5. Classification des Nano-composites:

On peut appliquer l'ancienne classification des composites suivant la nature de la matrice, dans l'ordre croissant de la température d'utilisation. Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans un domaine de températures ne dépassant pas (200 à 300°C), alors que les autres types de composites sont utilisés au-delà : jusqu'à (600°C) pour une matrice métallique et jusqu'à (1000°C) pour une matrice céramique [44].

I.5.6. Propriétés des nano-composites(polymère/NTC):

I.5.6.1. Propriétés mécaniques :

La résistance à la rupture de ces composites est améliorée lorsque la matrice et les charges possèdent une énergie interfaciale suffisante pour permettre le transfert des efforts de la matrice au renfort. La dispersion des nanotubes dans une matrice polyéthylène téréphtalate permet d'augmenter le module d'Young du polymère de (1,5GPa à 1,9 GPa) ainsi que la contrainte à la rupture de (60 MPa à 68 MPa) avec (2%) de (NTC) [46].

Dans une matrice polyéthylène une amélioration de (89% et 56%) respectivement du module d'Young et de la contrainte à la rupture peut être observée à (10%) de charges [45][46].

I.5.6.2. Conductivités thermiques

L'élaboration d'un matériau composite avec un niveau de conductivité thermique élevé est un défi important à relever du fait des applications prometteuses, en particulier dans la réalisation de composants électroniques. Diverses études ont récemment montré une augmentation de (40%) de la conductivité thermique d'une résine époxy ou du polyuréthane chargée à (0,5%) en masse de (CNTs) [47- 48].

I.5.6.3. Comportement au feu :

L'utilisation de nanocharges comme alternative aux agents retardateurs de flamme conventionnels permet d'améliorer fortement le comportement au feu des polymères. La charge la plus communément utilisée à cet effet est l'argile. Cependant, l'étude de nano-composites chargés en nanotubes de carbone montre l'efficacité de ces charges en tant qu'agent retardateur. [49], ont montré que le pic de débit calorimétrique de composites (PP/NTC) contenant (1%) et (2%) en volume de (NTC) ne représentait respectivement que (27%) et (32%) du pic de débit calorifique du polypropylène seul. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus pour des composites (PP/PP-g-AM) (polypropylène greffé anhydride maléique) /argile. L'introduction de (5%) en masse de (NTC) dans une matrice polyamide-6 montre également l'efficacité de ces charges dans le retard au feu [50] même si le mécanisme n'est pas encore totalement élucidé.

I.5.7. Interface matrice-renfort dans les nano-composites à matrice polymère :

La liaison entre la matrice et les renforts est un phénomène physico-chimique fondamental qui est créée lors de la phase d'élaboration du matériau composite. C'est l'interface matrice/renfort qui sera déterminante au niveau des propriétés finales du composite, et notamment du point de vue mécanique [51]. Il est à rappeler que pour la plupart des matrices polymères, la compatibilité avec les (CNTs)est faible du fait de leurs structures chimiques très différentes. En effet, l'adhésion entre un CNT et un polymère est mauvaise du fait des

tensions superficielles trop élevées [55]. Ce désagrément empêche par ailleurs une dispersion efficace et homogène des (CNTs) à l'intérieur de la matrice. De nombreuses études sont menées afin de comprendre et d'améliorer les phénomènes à l'interface [52],[53]. Il s'agit principalement de travailler au niveau de la cohésion entre les deux éléments constitutifs du composite. Ceci peut être réalisé grâce à une modification de surface des (CNTs) avant leur insertion dans la matrice.

I.5.8. L'effet des nano-composites sur les résines époxydes

La plupart des renforts composites utilisés dans le génie civil sont des composites carbone – époxyde ou verre – époxyde associant des fibres longues (carbone ou verre) à une matrice époxydique pour constituer un polymère renforcé de fibres (FRP – fiber reinforced polymer). [39]. Les avantages des résines époxydes sont la tenue mécanique, thermique, chimique et fatigue, Faible retrait (1 à 2%), une excellente adhérence sur fibres et la facile mise en œuvre. L'un des Inconvénients de ces résines est le prix élevé, la sensibilité à l'humidité, aux chocs et aux (UV) et le vieillissement sous la température.

La production mondiale des résines époxy est estimée à (0,83 Mt). Ce qui représente (30%) de la demande mondiale. Les principales applications sont données par la figure ci-dessous.

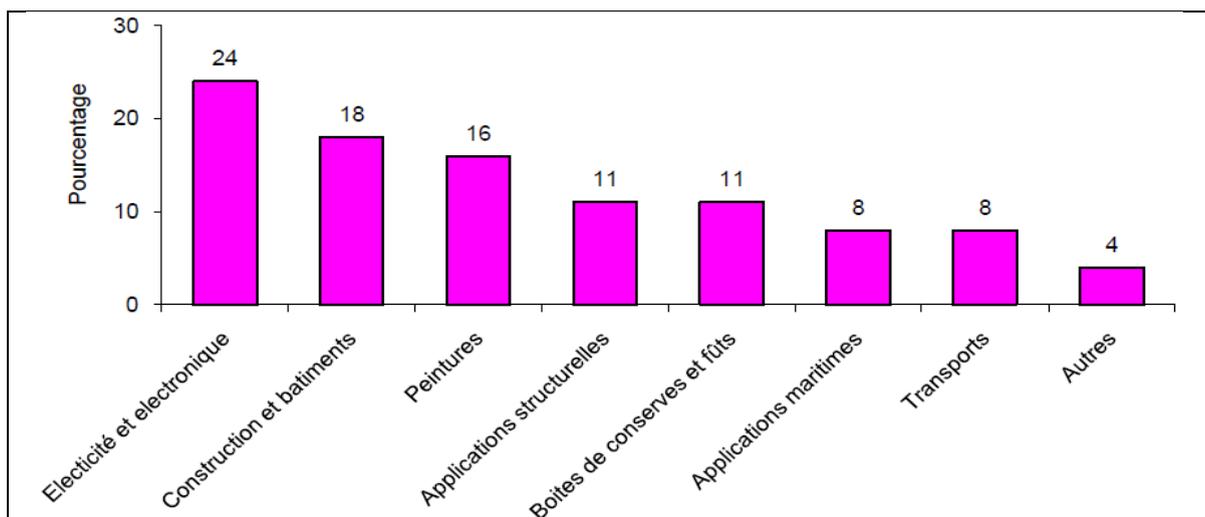


Figure I.15: Application des résines époxy [54]

Ces résines présentent plusieurs avantages :

- Importante commodité de mise en œuvre
- Excellente adhérence aux fibres de carbone ;
- Faible retrait au cours du durcissement ;
- Très bonne résistance aux agents et/ou conditions extérieurs.

Les résines les plus fréquemment utilisées dans la confection de ces composites sont des résines époxydes, dès lors que leurs températures d'utilisation ne dépassent pas 200 °C [39].

I.5.9. Conclusion :

Les nano-composites ont leurs propres limites intrinsèques notamment techniques le premier facteur à contrôler est la taille, la distribution et la répartition homogène des nanoparticules dans la matrice qui confèrent au matériau ses propriétés spécifiques [43]. Il faut développer de nouvelles techniques et procédés pour atteindre la phase d'industrialisation et surmonter les incompatibilités des méthodes antérieures vis-à-vis de la taille nanométrique. Sans ce passage à une production de masse et une baisse des coûts, les nano-composites se cantonneront à des marchés de niche, comme dans le secteur de l'aéronautique pouvant accepter un surcoût au profit de la performance, ou à des applications beaucoup plus ciblées qui ne peuvent être obtenues que grâce aux propriétés uniques des nano-composites. Le second problème est celui de l'approvisionnement des nano-composants à l'image de la production en masse de nanotubes de carbone qui, malgré leurs nombreux avantages, ne sont pas encore produits en quantité suffisante.

I.6-Nano-Renforts

I.6.1. Introduction

Les nano-renforts sont dispersées dans une matrice polymère sous forme de poudres ou nanofibres, destinées à modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface, et éventuellement, à diminuer le prix de revient du produit final. Elles varient beaucoup selon leur prix, leur composition et leurs caractéristiques physiques et chimiques [43].

I.6.2. Les nanocharges ou nano-renfort :

Une nanocharge est un renfort qui possède au moins une dimension de l'ordre nanométrique. Parmi les plus connues on cite : les nanotubes de Carbone, le fullerène, les nano argiles ou encore les poudres métalliques. Tous ces éléments (nanocharges) représentent les ingrédients clés des matériaux du futur. Ils permettent même sous de faibles taux de charges d'améliorer les propriétés des résines et peut se présenter sous forme de particules ou de nano fibres [57].

I.6.3. Les familles de nanocharge ou nano-renfort :

Il existe deux grandes familles de nanocharges, les nanocharges organiques et les non organiques. Les nanocharges à base organique sont multiples comme les nanotubes de carbones ou les fullerènes qui sont reconnues pour leurs impressionnantes propriétés mécaniques, électriques ou encore pour leurs propriétés magnétiques. Concernant les nanocharges inorganiques, on peut citer des exemples comme les nano-argiles ou les nano-silice cependant les plus utilisées actuellement sont les nano-argiles comme le talk ou la montmorillonite. Ce succès vient du bon compromis qu'ils offrent entre un coût très faible (matériau très abondant dans la nature), une facilité d'utilisation et la propriété d'être biodégradable. Malheureusement leurs propriétés hydrophiles rendent leur association avec la résine plus difficile d'où la nécessité d'intervenir pour les adapter aux résines organiques [58].

I.6.4. Classification de nanocharge ou nano-renfort :

En général, il est couramment admis que le classement des nano-composites se fait selon le facteur de forme de la charge incorporée (rapport entre la longueur et l'épaisseur ou le diamètre). Dans la définition admise des nano-composites les renforts doivent avoir au moins une de leurs dimensions morphologiques inférieure à 100 nm et peuvent être classés en fonction de leur géométrie ou nature. On trouve alors trois classifications selon leur géométrie [59].

I.6.4.1. Classifications selon leur géométrie:

On peut distinguer d différents types de classifications (Figure II.40).

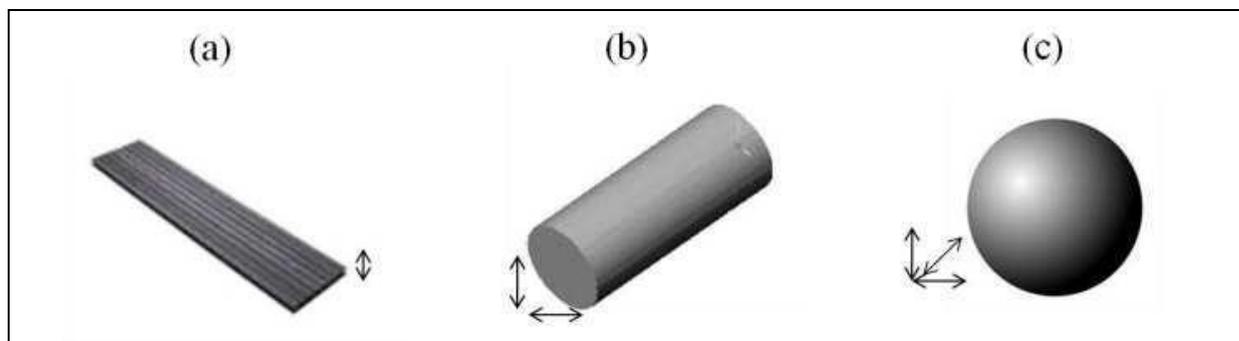


Figure I.16 : Classification des nano-composites selon la géométrie du renfort.[43]

a- Renforts de types 3Dimentions :

Ce sont des renforts dont les trois dimensions sont de l'ordre du nanomètre. On a alors affaire à des nanoparticules iso dimensionnelles telles que des billes de silice nanométriques (obtenues par voie sol-gel in situ ou par polymérisation directement depuis la surface de la charge). Exemple : la silice souvent utilisée dans les silicones, le noir de carbone utilisé comme renfort dans les pneus [60].

b- Renforts de type 2Dimentions :

Deux dimensions sont de taille nanométrique. La charge se présente donc sous forme de tube (Nanotubes de carbone) [61] ou sous forme de fibre (silicates aciculaires : la sépiolite) [62]

c- Renforts de type 1Dimention :

Dans ce cas, une seule dimension est de l'ordre du nanomètre ; les charges se présentent sous forme de plans d'épaisseur de l'ordre du nanomètre et de dimensions latérales allant de quelques dizaines à plusieurs centaines de nanomètres. Ces charges plaquettaires peuvent être aussi bien des argiles naturelles (par exemple : mono-morillonite) ou synthétiques (par exemple : la pointe) que des phosphates de métaux de transition (phosphate de zirconium $Zr(HPO_4)$). Les nano-composites dans ce cas sont obtenus par intercalation du polymère dans les galeries situées entre les plans des feuillets [63].

I.6.4.2. Classifications selon leur nature :

I.6.4.2.1. Noir de carbone

Actuellement, le noir de carbone est la particule conductrice la plus utilisée dans l'élaboration des composites et des polymères conducteurs (CPC), en raison de son prix de revient relativement faible, et de sa faible densité. Le noir de carbone se présente sous la forme d'une poudre constituée de particules. A l'échelle nanométrique, les particules de noir de carbone sont des masses sphéroïdales constituées par des atomes de carbone ayant une organisation plus ou moins graphitique [43].

Ces particules élémentaires ont des tailles de quelques dizaines de nanomètres. Elles sont liées entre elles par des liaisons covalentes et s'organisent en clusters pour former des entités tridimensionnelles complexes d'une centaine de nanomètres appelées agrégats. A leur tour, ces agrégats s'assemblent en amas par l'action des forces attractives du type Van der Waals pour former des agglomérats dont la taille peut atteindre plusieurs centaines de microns [64].

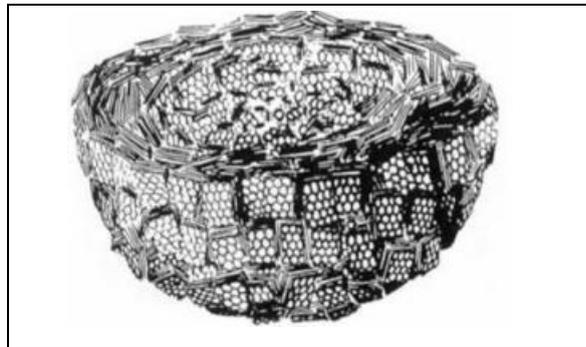


Figure I.17 : Vue en coupe d'une particule de noir de carbone [64]

Il existe de nombreuses qualités de noir de carbone, en fonction des matières premières utilisées ainsi que des conditions de combustion et de décomposition thermique [65].

- **Le noir de fourneau**, obtenu par combustion incomplète de gaz naturel ou de résidus pétroliers lourds, est la forme la plus commercialisée (95 %) ;
- **Le noir d'acétylène**, obtenu par craquage de l'acétylène des températures de plus de 2000 °C, est un des noirs de carbone les plus purs, il possède un caractère conducteur marqué, et il présente une très forte aggrégation ;
- **Le noir de fumée**, obtenu par combustion incomplète d'hydrocarbures de goudron, possède des qualités exceptionnelles de renforcement des pneumatiques en caoutchouc ;
- **Le noir thermique**, obtenu par chauffage d'une chambre réfractaire suivi d'une injection de gaz naturel qui génère la formation de carbone et d'hydrogène. Il présente les particules les moins fines (de 150 à 500 nm) et la surface spécifique la plus faible (de 6 à 15 m²/g) ;
- **Le noir tunnel**, produit par combustion incomplète de gaz naturel vers la fin du 19^{ème} siècle, n'est pratiquement plus fabriqué actuellement. C'était la forme la plus commercialisée au début du 20^{ème} pour le caoutchouc et les pigments (sa production est actuellement interrompue sauf en Allemagne), Ses particularités : granulométrie très fine (inférieure à 30 nm), faible degré d'aggrégation, taux élevé de substances volatiles (environ 5 %).

I.6.4.2.2. Les poudres métalliques

Les poudres métalliques (argent, nickel, cuivre, aluminium) généralement utilisés pour améliorer les caractéristiques de conductivité de composites. Elles présentent un faible facteur de forme et donc nécessitent de grandes concentrations pour obtenir un réseau conducteur. Les composites contenant des particules métalliques dans leur composition, sont élaborés dans l'objectif d'obtenir un niveau de conductivité maximal [43].

Les charges métalliques possèdent un coefficient de dilatation thermique élevé et s'oxydent facilement, du fait, de leur énergie de surface très élevée. Ces charges vieillissent donc très mal dans un environnement oxydant, elles présentent une densité très grande comparativement avec la poudre de noir de carbone et un coût économique très élevé, ce sont les raisons qui restreignent leurs utilisations [64].

I.6.4.2.3 Feuillet Argile

L'argile la plus étudiée dans l'industrie de la recherche est la montmorillonite (MMT) [66]. Cette argile a été impliquée dans la synthèse pré biotique de biomolécules et des différentes sources de la vie sur terre. Les argiles sont également devenues indispensables à la vie moderne [67]. Elles ont été connues et utilisées par les humains depuis l'antiquité. Elle est le matériau de base de nombreux types de céramiques, telles que la porcelaine, des briques, des tuiles et des appareils sanitaires, ainsi qu'ils sont un des constituants essentiels des matières plastiques, les peintures, le papier, le caoutchouc et les produits cosmétiques. L'argile est non polluante et peut être aussi utilisée en tant qu'agent d'élimination de polluant [68]. Ainsi, le potentiel de certaines argiles à disperser sous forme de particules unitaires d'une taille nanométrique dans une phase de polymère, formant des matériaux nano-composites ayant des propriétés supérieures est d'une grande importance pour le futur proche [66- 68].

I.6.4.2.4. Le graphène

Le graphène est constitué d'une seule couche d'atomes de carbones. En termes simples, le graphène est une mince couche de carbone pur. Il s'agit d'une seule couche d'atomes de carbone étroitement liée qui sont liées ensemble dans un treillis en nid d'abeille hexagonal. En termes plus complexes, il s'agit d'une allotropie de carbone dans la structure d'un plan d'atomes liés avec une longueur de liaison moléculaire de 0,142 nm. Ainsi, les couches de graphène empilées les unes sur les autres forment du graphite, avec un espacement inter planaire de 0,335 nm [69].

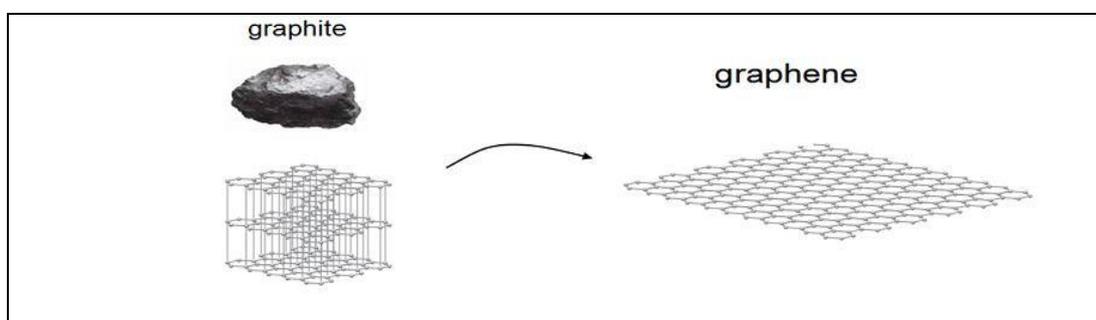


Figure I.18 : Graphène à partir du graphite [70]

I.6.4.2.5. Les nano fibrilles de cellulose

La cellulose native se présente, dans le monde végétal, sous forme de nano-fibrilles semicristallines. L'assemblage des parties cristalline de la cellulose au sein des nano-fibrilles fait depuis longtemps l'objet de controverses. Les zones cristallines sont reliées dans la longueur par des zones amorphes responsables du clivage des nano-fibrilles en nanocristaux plus courts (les whiskers de cellulose présentée précédemment) lors de leur hydrolyse acide[71]. Dans ce type de matériaux cellulosiques, les caractéristiques de la cellulose qui les constituent (forme, taille, cristallinité...) ainsi que la force des liaisons entre fibres sont des paramètres qui vont évidemment fortement conditionner les propriétés mécaniques du matériau. Cependant, très peu d'études existent portant sur des matériaux nano-composites constitués d'une matrice polymère dans laquelle est dispersée de la cellulose à l'état nano fibrillaire (on peut citer l'article de Dufresne et Vignon [72]).

I.6.4.2.6. Nanotubes ou Nano fibres de carbone :

Les nanotubes de carbone sont des tubes jusqu'à mille fois plus longs que larges, d'un diamètre de l'ordre du nanomètre. Ils ont de quelques microns à quelques dizaines de microns de longueur. Ces matériaux sont les premiers produits industriels issus de la nanotechnologie et ils sont souvent présentés comme le matériau miracle du XXIème siècle [43].

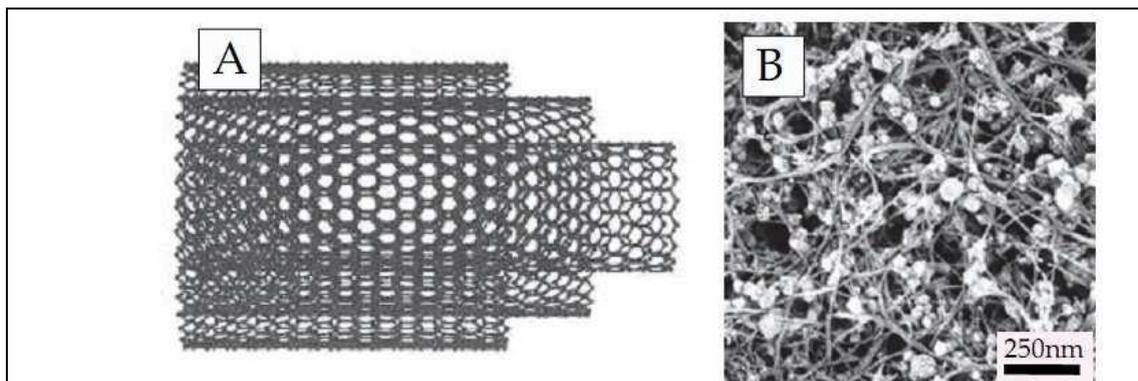


Figure I.19 : Nanotube du carbone [43].

Cette figure montre la schématisation de nanotube du carbone multicouche (A) et l'image par MEB de nanotubes de carbone (B)[59].

En générale trois types de nanotubes de carbone peuvent être considéré :

- Nanotubes de carbones mono feuillets, formés par un plan de graphène roulé sur lui-même et fermés à leurs extrémités par deux demi-fullerènes présentent un diamètre entre 1 et 2 nm.
- Nanotubes de carbones doubles feuillets, formés par deux plans de graphène concentriques et présentent un diamètre entre 2 et 4 nm.
- Nanotubes de carbone multi feuillets, où plusieurs plans de graphène sont enroulés concentriquement, les extrémités des tubes ayant une structure plus complexe et présentent un diamètre entre 4 et 150 nm. [59].

I.6.5. Conclusion

Ce chapitre, qui constitue sur les nano-renfort a montré l'importance de ces nano-objets dans le domaine des nanosciences. Leurs dimensions particulières ainsi que leurs propriétés diverses ouvrent à l'industrie des perspectives d'innovations nombreuses et prometteuses. En premier lieu, nous avons donné une vue générale sur les nanocharges utilisées pour le renforcement, telle que, le noir de carbone, les poudres métalliques, feuillet Argile, le graphène, les nanofibres de carbone et les nano-fibrilles de cellulose. Dans une seconde partie, nous avons vu les différentes propriétés d'un nanotube de carbone. On notera également que la structure géométrique du nanotube a une grande influence sur ses propriétés. En raison des propriétés physiques remarquables, Les nano renforts de carbone font l'objet d'une attention particulière. La combinaison de leurs propriétés mécaniques, thermiques renforcées avec des densités très faibles font penser que les (CNT) sont les candidats idéaux pour des nano-composites polymères hauts performance [43].

Chapitre II : Analyse Numérique et Cas d'étude

II.1 –Méthode des éléments finis

II.1.1 Introduction

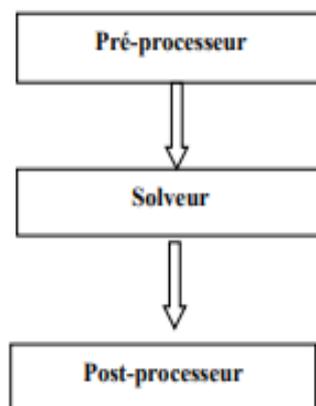
L'analyse aux éléments finis (MEF) est une méthode de calcul utilisée dans les domaines scientifique et technique. Avec les éléments finis, il est possible de calculer des problèmes complexes qui ne peuvent pas être résolus par d'autres méthodes. En effet, la méthode des éléments finis étant une analyse numérique consistant à résoudre des équations différentielles, il est possible de l'utiliser dans divers domaines physiques. 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. Cette subdivision a donné le nom de la méthode numérique : méthode des éléments finis. En ingénierie, la méthode des éléments finis est aujourd'hui une méthode standard dans le calcul assisté par ordinateur des charpentes et structures planes [73].

III.1.2 Etapes du calcul de la MEF :

III.1.2.1 Étapes logiques du calcul par éléments finis :

1. Définir les nœuds et les éléments (Créer le maillage)
2. Pour chaque élément, établir la matrice de rigidité élémentaire $[k_e]$ reliant les degrés de libertés (déplacements) nodaux $\{u_e\}$ et les forces $\{f_e\}$ appliquées aux nœuds : $[k_e] \{u_e\} = \{f_e\}$
3. Assembler les matrices et les vecteurs élémentaires en un système global $[K] \{U\} = \{F\}$ de manière à satisfaire les conditions d'équilibre aux nœuds
4. Modifier le système global en tenant compte des conditions aux limites
5. Résoudre le système $[K] \{U\} = \{F\}$ et obtenir les déplacements $\{U\}$ aux nœuds
6. Calculer les gradients (flux de chaleur, déformations et contraintes) dans les éléments et les réactions aux nœuds sur lesquels les conditions aux limites sont imposées.

Tableau II.1 : Organigramme d'étapes logiques du calcul par éléments finis



- **Préprocesseur**
 - Choisir le type d'éléments
 - Entrer les propriétés géométriques
 - Entrer les paramètres physiques
 - Créer le modèle géométrique
 - Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments
 - Appliquer les sollicitations
 - Imposer les conditions aux limites

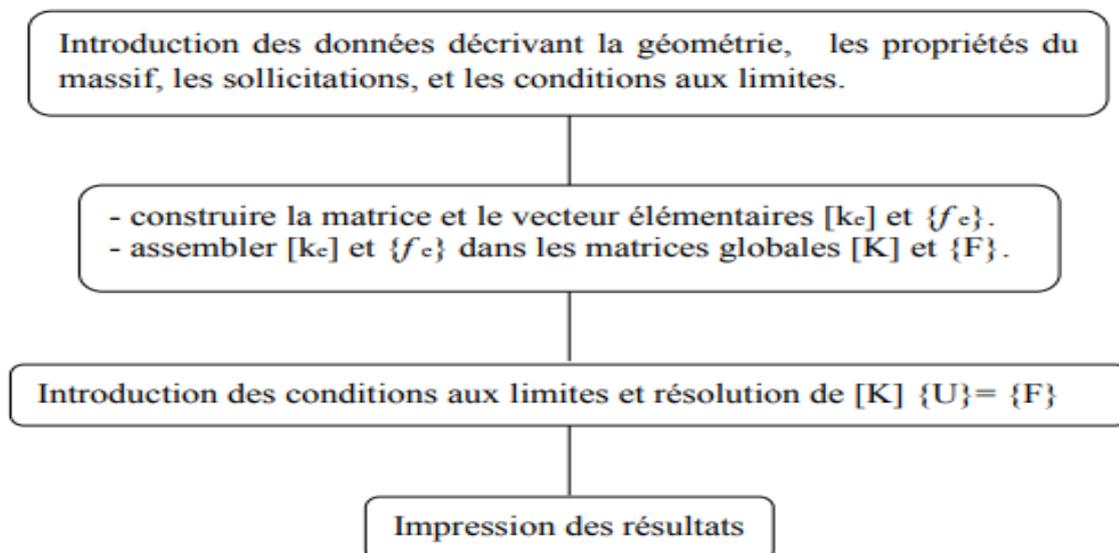
- **Solveur :**
 - Choisir le type d'analyse (statique, dynamique,)
 - Construire la matrice et le vecteur élémentaire $[k_e]$, $\{f_e\}$
 - Assembler $[k_e]$ et $\{f_e\}$ dans $[K]$ et $\{F\}$
 - Prendre en compte les conditions aux limites
 - Résoudre le système d'équations $[K] \{U\} = \{F\}$
 - Calculer les variations additionnelles (gradients, réactions, $\epsilon \dots$).

- **Post-processeur**
 - Présenter les résultats de façon intelligible et synthétique
 - Sous forme numérique
 - Sous forme graphique
 - Effectuer des fonctions complémentaires : combinaisons, interprétations Interpolations, animation. [20]

II.1.2.2 Etapes d'un programme d'éléments finis :

Le tableau suivant résume les parties de base du programme d'ordinateur pour la résolution complète d'un problème par la méthode des éléments finis.

Tableau II.2 : Organigramme d'étapes caractéristiques d'un programme d'éléments finis



II.2- Logiciel Ansys

Ce produit 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
- ❖ La gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

II.2.1- Principaux produits Ansys

- ANSYS Structural :
- ANSYS Mechanical
- ANSYS CFX et Fluent
- ANSYS Gambit
- ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA
- ANSYS Electromagnetics et Ansoft
- ANSYS Multiphysics

II.2.2-Environnements logiciels

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

a- ANSYS classic :

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 utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

b- 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 pièces) 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. La plateforme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

II.2.3-Version étudiants

Ansys fournit des produits logiciels gratuits pour les étudiants, parfaits pour le travail effectué en dehors de la salle de classe, comme les devoirs, les projets clés, les concours étudiants et plus encore. Nos produits renouvelables peuvent être téléchargés par des étudiants du monde entier. Les produits Ansys étudiant peuvent être installés sur toute machine MS Windows 64 bits prise en charge. En savoir plus sur Découvrez la vie d'étudiant, Ansys AIM étudiant et Ansys étudiant pour pouvoir les télécharger dès aujourd'hui [74].

La version étudiante est la version gratuite de Ansys c'est pour ça elle est limitée comme suit :

- ❖ Physique structurale : 32K nœuds / éléments
- ❖ Physique des fluides : 512 000 cellules / nœuds
- ❖ Électromagnétisme : N / A

II.2.4-L'avantage de choisir APDL

Naviguez confortablement dans l'interface utilisateur Mechanical APDL et appliquez un flux de travail éprouvé pour créer, résoudre et post-traiter des modèles d'éléments finis 2D et 3D.

Les avantages d'utiliser le produit APDL par rapport à l'autre produit comme Workbench sont les suivants :

- ❖ -Importez et / ou créez une géométrie selon les besoins pour la création de leur modèle de simulation.
- ❖ -Utilisez la logique de sélection pour opérer efficacement sur les sous-régions d'un modèle pour le maillage, le chargement et le post-traitement.
- ❖ -Comprendre le concept d'attributs d'élément et l'appliquer à la création de maillages efficaces et efficaces à l'aide de poutres, de coques et d'éléments solides.
- ❖ -Créez des interactions complexes entre les régions du modèle grâce au contact, au couplage, aux équations de contrainte et aux interfaces boulon / joint.
- ❖ -Mettez en œuvre des solutions de champ couplé en utilisant des éléments d'écoulement de fluide 1-D et des éléments solides 2-D et 3-D.

II.2.5-Conclusion

Dans le but de modéliser d'un élément structural nous avons choisi la méthode des éléments finis MEF qui est un outil de résolution numérique approchée des problèmes de structures, des problèmes physiques et mécanique régis par des équations différentielles. En général, un logiciel d'analyse se compose de trois modules fondamentaux : préprocesseur, calcul et post-processeur ; qui se résume à l'ANSYS 2020R1 version Académique pris en considération lors de notre étude.

II.3-Analyse Numérique et cas d'étude

II.3.1 -Introduction

Dans cette étude trois différents modèles ont été créés afin d'étudier le comportement d'un pont de béton renforcé avec nano composites :

- a) Modélisation de pont sans renforcement.
- b) Modélisation de pont par matériaux composites traditionnels.
- c) Modélisation de pont avec nano composites.

La modélisation et la simulation des éléments en béton renforcé par nano composites est exécutée dans le code commercial d'analyse par éléments finis ANSYS. Pour développer un modèle d'analyse par éléments finis un processus typique d'analyse est suivi. Tous les paramètres qui sont exigés pour exécuter l'analyse sont définis. En premier lieu la géométrie et les propriétés des matériaux constituant les modèles sont définis. Puis on procède à un maillage du modèle ensuite, les conditions aux limites pour chaque modèle sont définies et finalement le modèle est soumis au type d'analyse approprié.

II.3.2-Description du cas d'étude

Le pont en question est un passage supérieur sur Oued el Hachem se trouvant à Cherchell distante de 80Km à l'ouest d'Alger, se localisant dans la zone III caractérisée par des fortes activités sismiques, à la wilaya de Tipaza qu'est une zone proche de la mer, il y a donc des effets du phénomène de carbonatation du béton, et pour cette raison la structure nécessite une réparation et un renforcement de ses éléments porteurs. L'ouvrage est un pont hyperstatique à trois travées, le tablier est constitué de quatre poutres maîtresses en béton armé, à inertie variable, liées par des entretoises et longrines surmontées d'une dalle en béton armé, tandis que l'infrastructure est composée de deux piles intermédiaires et une pile centrale et de deux sommiers (culées) sous forme d'appuis simples en béton armé (Figure II.1)



Figure II.1 : Détails du pont d'Oued el Hachem

II.3.3- Géométrie des éléments de l'ouvrage

La structure de pont d'Oued el Hachem avec une configuration géométrique complexe, dont les caractéristiques géométriques sont (Figure II.2) :

- ❖ Longueur totale tablier : 69m
- ❖ Nombre de poutres sous chaussée : 4 poutres espacées de 1.8m (entre axes).
- ❖ Pont à poutres en BA (voir schéma) surmontées d'une dalle de 25cm en BA
- ❖ Largeur totale du pont : 10.40m dont deux trottoirs de 1.7m chacun (Figure II.3)
- ❖ Infrastructures en BA : 3 Piles à voiles + 2 sommiers
- ❖ Pont hyperstatique à 2 travées (de 24m) et deux consoles (de 10.5m).
- ❖ Fondations superficielles : Pour les piles semelle (9*1.5*5) m.
- ❖ Les sommiers semelle (9*1*4) m.

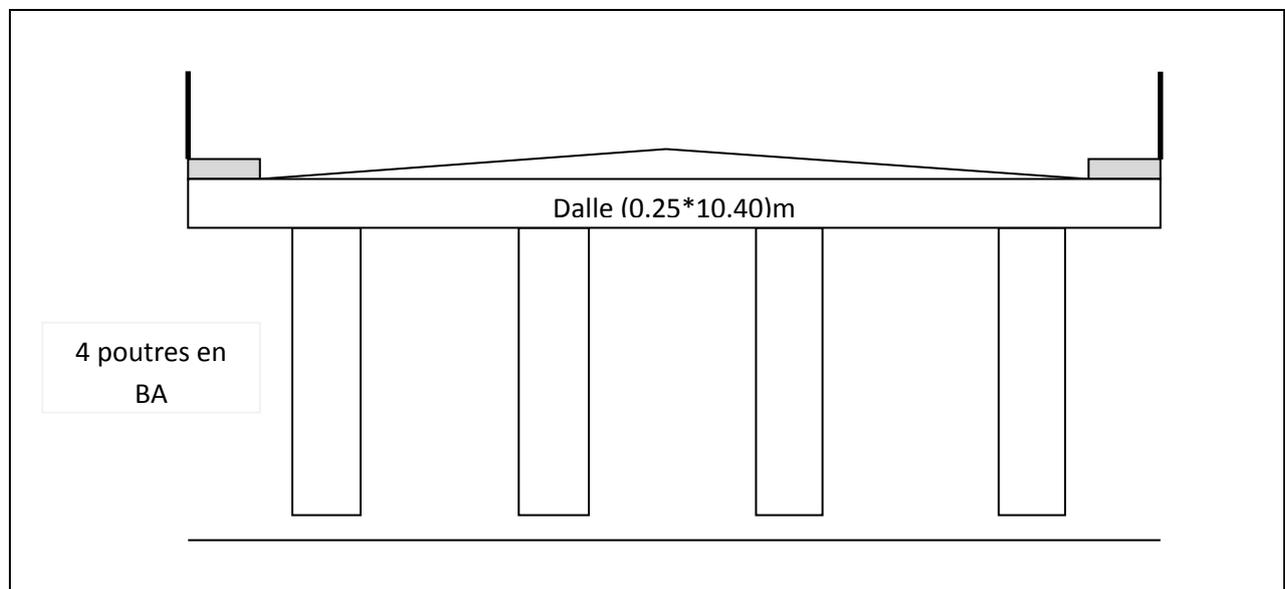


Figure II.2: Géométrie de l'ouvrage

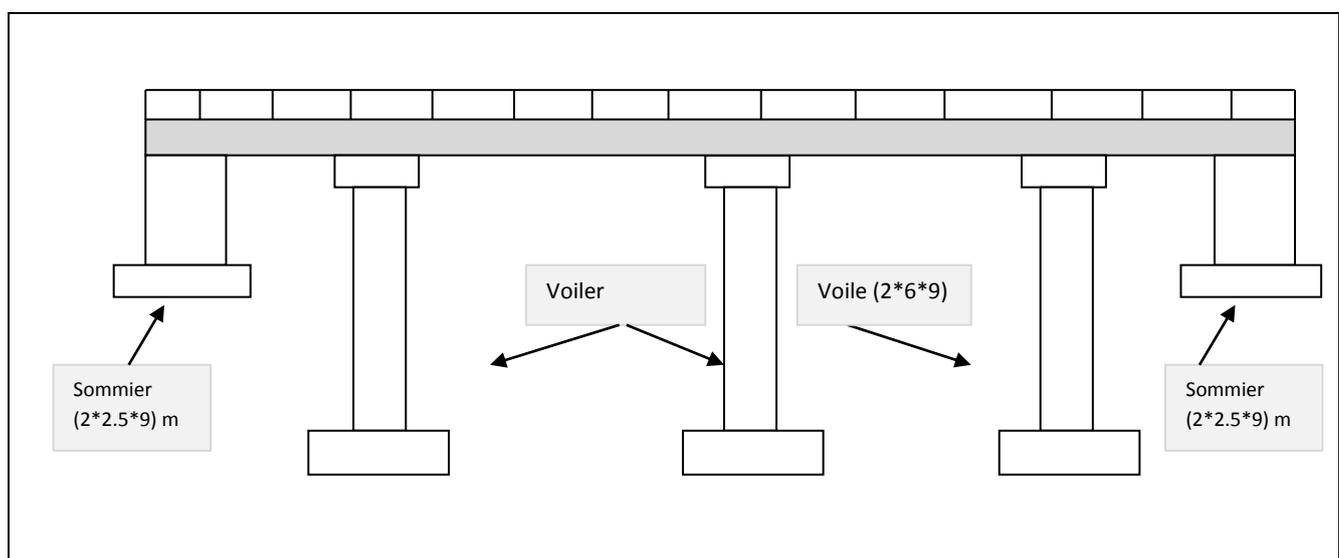


Figure II.3: Géométrie d'infrastructure de pont

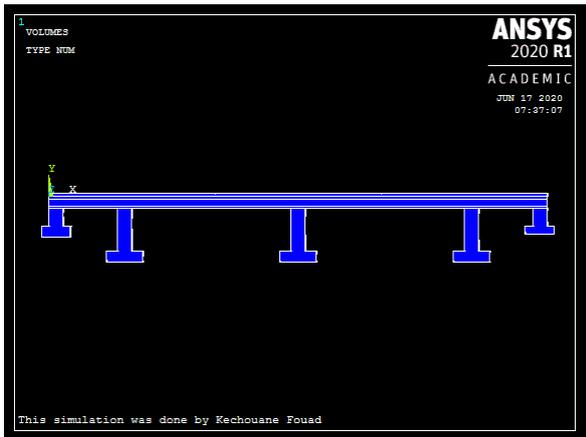


Figure II.4 : Vue de face du pont



Figure II.5 : Vue de coté du pont



Figure II.6: Vue supérieur du pont

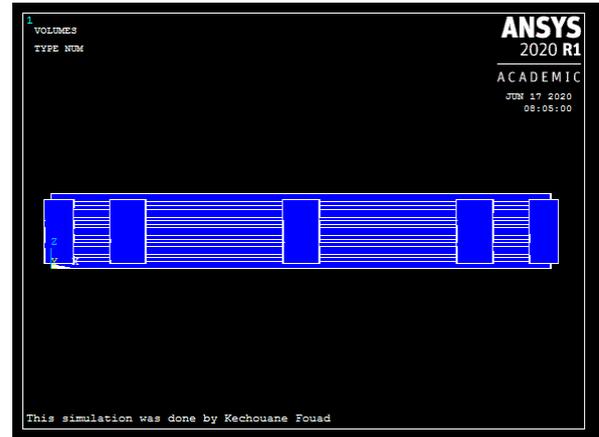


Figure II.7: Vue inferieur du pont

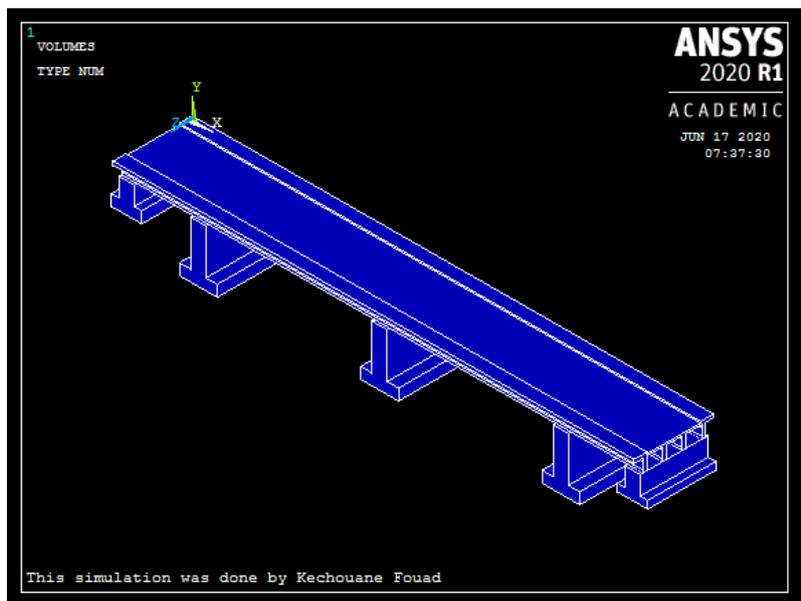


Figure II.8 : Vue oblique du pont

II.3.4-Propriétés des matériaux

II.3.4.1- Béton armé

L'élément "**Solid 65**" est utilisé pour modéliser le béton armé dans ANSYS. 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 [75]

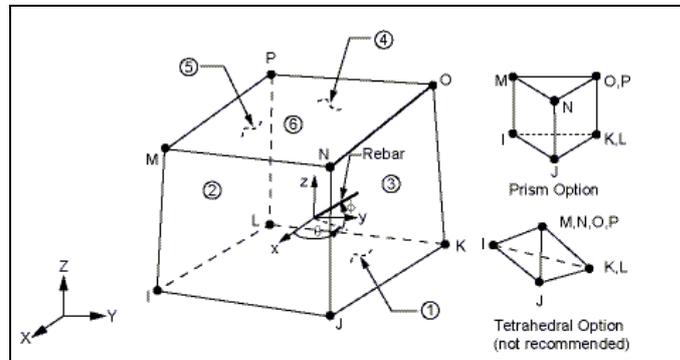


Figure II.9 : Solid 65 à 3D [75].

Les analyses modales sous ANSYS demandent la connaissance des propriétés thermomécaniques suivantes des matériaux :

- Module d'élasticité (E_c)
- Coefficient de poisson (ν)
- Densité (δ)

Pour les trois modèles (modélisation de pont sans renforcement, modélisation de pont par matériaux composites traditionnels, modélisation de pont par nano composites) les propriétés du béton sont identiques et sont les suivantes :

Tableau II.3: Propriétés de Béton armé

Module d'élasticité (E_c)	25000MPa
Coefficient de poisson (ν)	0.2
Densité (δ)	2500 Kg/m ³

II.3.4.2- Les composites

L'élément "**Solid 185**", est un élément solide utilisé pour modéliser le comportement des matériaux composites. L'élément peut avoir plusieurs couches pour différentes orientations avec ses propriétés ortho-tropiques dans chaque couche, trois degrés de libertés pour chaque nœud et un déplacement pour chacune des trois directions [76].

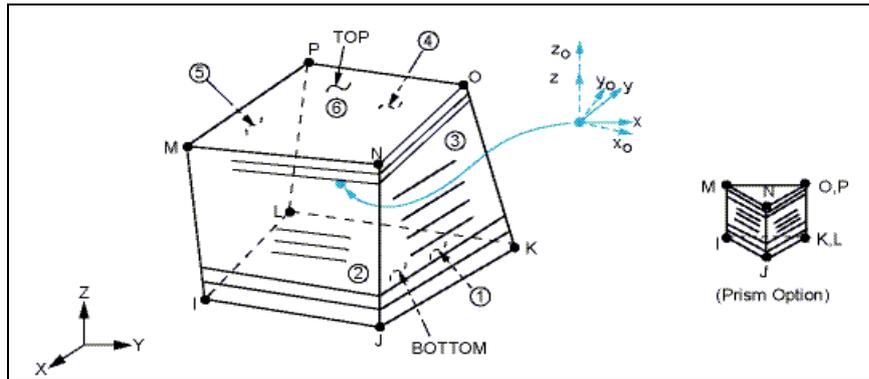


Figure II.10: Solid 185 à 3D [76].

Pour les deux modèles (modélisation de pont par matériaux composites traditionnels et modélisation de pont par nano composites) les propriétés des renforts sont identiques mais la différence est dans le résine époxydique comme suite :

II.3.4.2.1-Renforcement par lamelle

Le renforcement en flexion d'éléments d'ouvrages par PRFC est réalisé en collant des lamelles Sika CarboDur en surface des zones tendues du béton armé [77], c'est pour ça dans notre cas nous utilisant lamelle Sika CarboDur aux dessous du les quatre poutres de pont.

a) Lamelles Sika CarboDur S1512

Les lamelles Sika CarboDur sont des PRFC (Polymères Renforcés de Fibres de Carbone) fabriqués selon le procédé de pultrusion en usine. Contrairement aux tissus que l'on imprègne sur chantier, les conditions de fabrication des lamelles sont strictement contrôlées ce qui permet de garantir les caractéristiques du renfort PRFC. Contrôle de production : chaque lot de produits finis (env. 3000 m) est contrôlé en ce qui concerne le module d'élasticité, la résistance en traction, l'allongement à rupture. La largeur et l'épaisseur des lamelles sont contrôlées sur chaque rouleau de 250 m [77].

Les caractéristiques utilisées dans les dimensionnements des lamelles sont basées sur le traitement statistique des valeurs obtenues lors du contrôle qualité permanent assuré en usine.

Tableau II.4: 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

Le Sikadur-30 est une colle époxydique à deux composants A et B sans solvant, thixotrope, de couleur gris clair, utilisée pour le collage des lamelles Sika CarboDur [77],

❖ Matériaux composites traditionnels

Les propriétés du colle époxydique Sikadur-30 pour le cas de la modélisation de pont par matériaux composites traditionnels sont les suivantes :

Tableau II.5: Propriétés de la résine Sikadur-30.

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

❖ Nano-composites

Avec une charge de (2%) de (NTC) une augmentation de (214%) du module d'élasticité est observée dans une matrice [45]. Donc les propriétés du colle époxydique Sikadur-30 pour le cas de la modélisation de pont par nano composites devient comme suite :

Tableau II.6: Propriétés de la résineSikadur-30amélioré.

Module d'élasticité (E_c)	30144MPa
Coefficient de poisson (ν)	0.4
Densité (δ)	1650 Kg/m ³

II.3.4.2.2-Renforcement par tissu

Les tissus de la gamme SikaWrap sont principalement utilisés en tant que renfort d'éléments de structures travaillant à l'effort tranchant (poutres), à la compression (confinement de poteau). Ils peuvent aussi être utilisés en tant que renfort d'éléments de structures travaillant en flexion (dalles, poutres) [82], c'est pour ça dans notre cas nous utilisant les tissus SikaWrap aux côtés du les quatre poutres de pont.

a) Les tissus SikaWrap-600 C

Le renfort composite PRFC, fabriqué in situ, est réalisé en associant un tissu SikaWrap marouflé dans une résine Sikadur bien définie. Chaque tissu doit donc être utilisé avec la résine spécifiée ; le système ainsi formé ne peut faire l'objet d'aucune modification car les performances du PRFC dépendent à la fois du tissu et de la résine d'imprégnation.

Le tissu dit « lourd » SikaWrap-600 C est un tissu unidirectionnel de fibres de carbone assemblées par couture, applicable après imprégnation préalable du support et du tissu-application dite « par voie humide » [77].

Tableau II.7: Propriétés de SikaWrap -600 C

Module d'élasticité (E_c)	235000MPa
Coefficient de poisson (ν)	0.3
Densité (δ)	1800 Kg/m ³

b) Colle époxydique Sikadur-300

Le Sikadur-300 est la résine d'imprégnation du tissu SikaWrap-600 C'est le primaire pour le support. [77].

❖ Matériaux composites traditionnels

Les propriétés du colle époxydique Sikadur-300 pour le cas de la modélisation de pont par matériaux composites traditionnels sont les suivantes [78] :

Tableau II.8: Propriétés de la résine Sikadur-300

Module d'élasticité (E_c)	2800MPa
Coefficient de poisson (ν)	0.4
Densité (δ)	1160 Kg/m ³

❖ Nano composites

Avec une charge de (2%) de (NTC) une augmentation de (214%) du module d'élasticité est observée dans la matrice [45]. Donc les propriétés du colle époxydique Sikadur-30 pour le cas de la modélisation de pont par nano composites devient comme suite :

Tableau II.9: Propriétés de la résineSikadur-300amélioré.

Module d'élasticité (E_c)	8792MPa
Coefficient de poisson (ν)	0.4
Densité (δ)	1160 Kg/m ³

II.3.5-Maillage

Le maillage est une méthode pour diviser l'élément en question en particules élémentaires ayant les mêmes propriétés et examiner chaque particule séparément, l'assemblage des particules élémentaires nous ramène à l'élément initial. Dans ce modèle on a utilisé pour le maillage (discrétisation de l'élément), le "Mesh Tool" a été choisi dans l'étape de création des mailles (éléments finis) qui n'est pas un part à la solution.

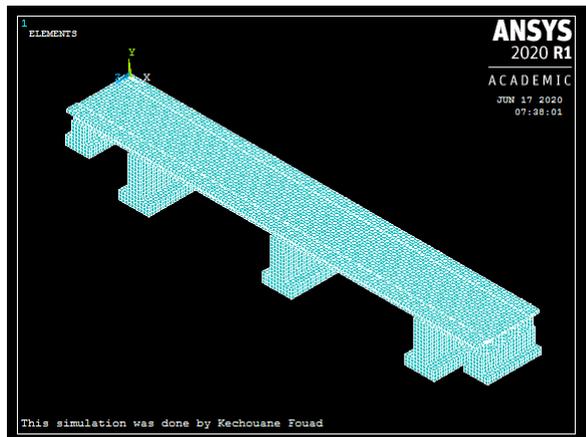


Figure II.11: Création des mailles du pont

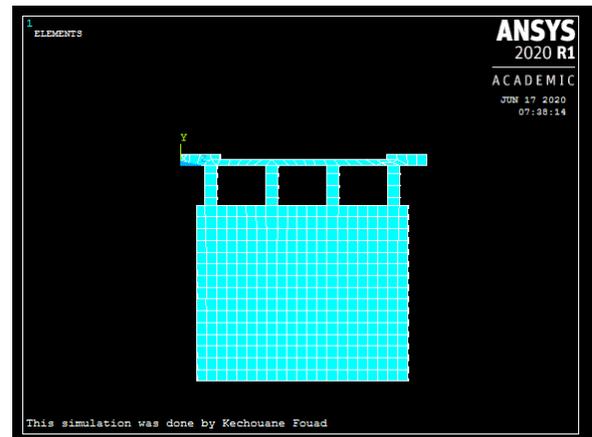


Figure II.12: Maillage du pont

On a procédé de former un maillage sur certaines lignes choisies (longueur, largeur et hauteur) de pont et gérer ainsi la densité du maillage dans les différentes régions de l'ouvrage. Pour l'élément solid65, la maille a été mise en place pour la création d'éléments rectangulaires. Les divisions choisies des lignes sont notées et le modèle adopté a été maillé en utilisant des éléments en ligne afin que les nœuds des éléments en ligne soient exactement sur le nœud des éléments. Ce maillage adopté a donné un certain nombre de nœuds dont le nombre total est comme suite :

Tableau II.10 : Nombre des Nœuds de pont.

Le cas de modélisation	Nombre des Nœuds			Nombre totale
	Béton armé	Les renforts	Résine époxydique	
Sans renforcement.	21521	/	/	21521
Par M.C traditionnels.	21521	4031	4031	29583
Avec nano composites.	21521	4031	4031	29583

Le modèle produit a été maillé en utilisant des éléments cubiques de 500 mm de côté. Le maillage aide à augmenter la précision des calculs en commandant le nombre d'éléments. Plus le maillage est raffiné l'exactitude de la simulation augmente mais dans notre cas nous utilisons la version étudiant de ANSYS qui est limité par une valeur maximale des nœuds qui égale à 32000 nœuds, et dans le but d'une exploitation optimale de se nombre des nœuds limités nous choisissons un maillage le plus petit possible pour cette version académique de ANSYS.

Tableau II.11 : Nombre des éléments de pont.

Le cas de modélisation	Nombre éléments
Sans renforcement.	13213
Par M.C traditionnels.	18738
Avec nano composites	18738

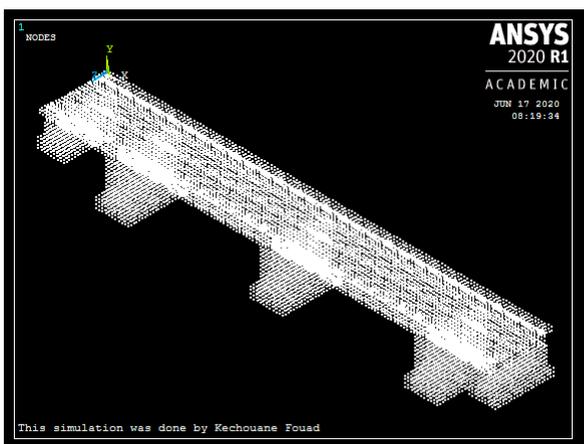


Figure II.13: Création des nœuds du pont

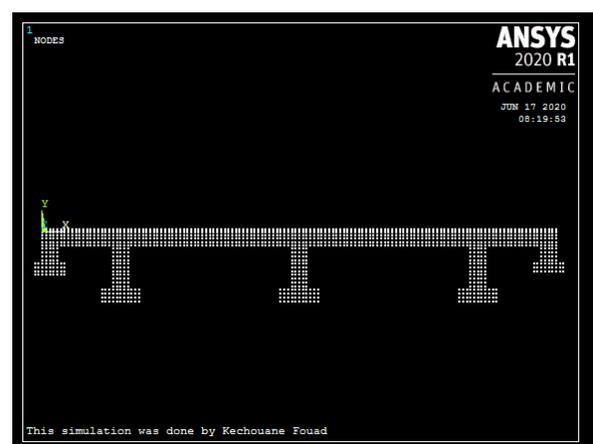


Figure II.14: Aperçu des nœuds

II.3.6-Conditions aux limites

Dans cette modélisation nous avons l'axe x du système des coordonnées coïncide avec l'axe longitudinal de la pont et l'axe y coïncide avec la verticale de pont et l'axe z représente l'axe transversal de pont étudié.

Les conditions aux limites choisies pour les trois cas de modélisations de ponts (modélisation de pont sans renforcement, modélisation de pont par matériaux composites traditionnels, modélisation de pont par nano composites) sont identiques, présentent des encastresments aux niveaux des fondations dans laquelle les déplacements ont été bloqués suivant les trois directions (ox, oy, oz)



Figure II.15: Conditions aux limites

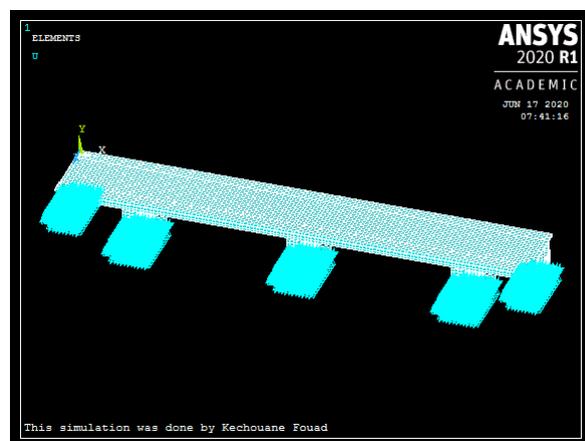


Figure II.16: Fondations bloquées

II.3.7. Modélisation des composites

Les dimensions et les distances aux bords de lamelle et le tissu avec leurs résines époxydiques doit être modélisés selon les 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

II.3.7.1-Pose de la lamelle Sika CarboDur

- a) 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).
- b) Distance aux bords : sur les bords de poutre à renforcer, il faut respecter une distance entre la lamelle et l'arête de la poutre. La lamelle doit être positionnée à une distance équivalente à au moins l'enrobage des armatures internes du béton armé. Cela évite de renforcer une zone non armée sujette à fissuration.



FigureII.17 : Sikadur-30

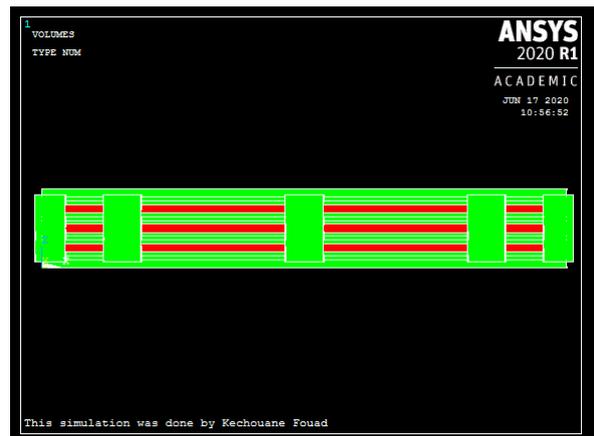


FigureII.18 : La position de Sikadur-30

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. [77].



FigureII.19 : Sika CarboDur



FigureII.20 : Position de Sika CarboDur

II.3.7.2-Application du tissu SikaWrap-600 C

Etape A :

Application du primaire sur le support Le choix du primaire Sikadur-300 ou -330 doit se faire en fonction du profil de la surface du support, des irrégularités, de la texture et du nombre de couches de tissu à mettre en œuvre :

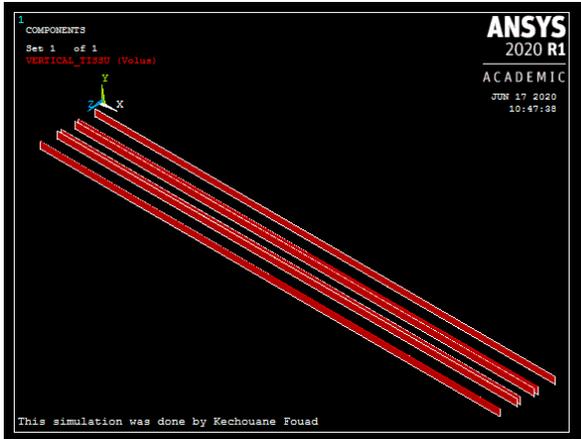
a) Cas général :

Support lisse, peu de rugosité, absence de bullage, appliquer le Sikadur-300. Consommation $\approx 200 \text{ g/m}^2$. L'application se fait à l'aide d'un rouleau.

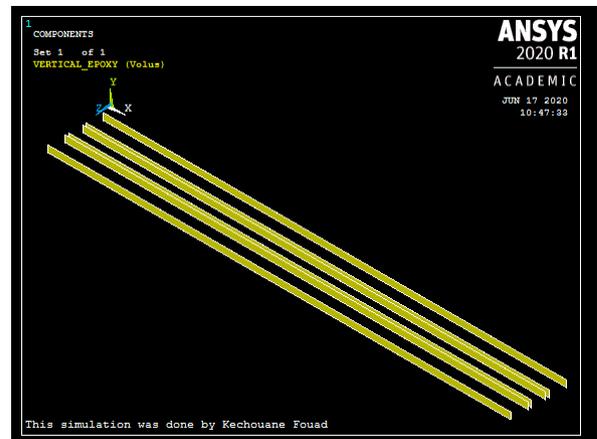
b) Cas particuliers :

Si la surface du support présente une rugosité moyenne à importante, s'il y a un bullage important le primaire Sikadur-330 doit être utilisé. Consommation ≈ 250 à 500 g/m^2 .

L'application se fait à l'aide d'un rouleau, d'une taloche crantée, d'une brosse, d'une truelle.



FigureII.21: SikaWrap-600C

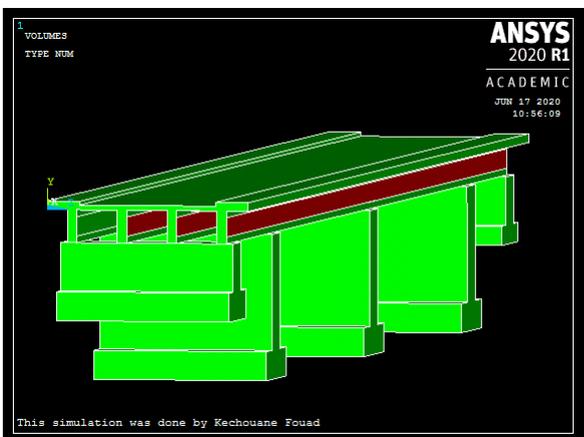


FigureII.7.22: Sikadur-300.

Etape B :

Imprégnation du tissu SikaWrap-600 C sur plan de travail

- Sur le plan de travail revêtu d'une feuille de plastique propre, répartir les $2/3$ de la quantité prévue de résine Sikadur-300, soit environ $0,7$ à 1 kg/m^2 ,
- Placer le tissu SikaWrap-600 C prédécoupé sur la feuille plastique enduite de résine Sikadur-300.
- Imprégner le tissu dans la résine à l'aide d'un rouleau laine ou plastique ou raclette caoutchouc dans la direction longitudinale des fibres jusqu'à ce que la résine pénètre et sature le tissu.
- Répartir ensuite le $1/3$ restant ($0,3$ à $0,5 \text{ kg/m}^2$) de résine Sikadur300 sur le tissu, puis enduire uniformément à l'aide du rouleau pour saturer complètement le tissu.



FigureII.23 : Position de SikaWrap-600C



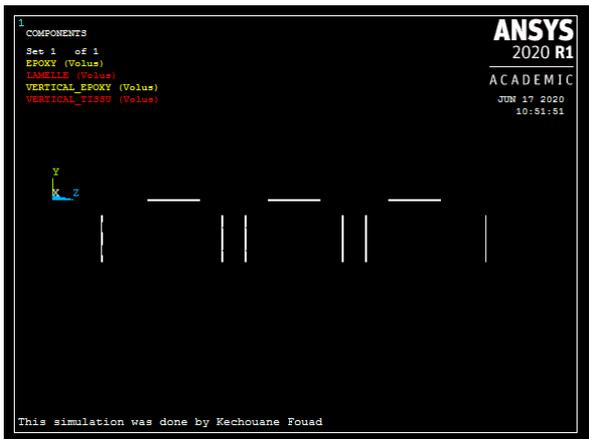
FigureII.24: Vu de SikaWrap-600C

II.3.7.3-Géomètres des composites

Les géomètres de lamelle et le tissu avec leurs résines époxydiques sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau II.12: Géomètres des composites

	Longueur (m)	Largeur(m)	L'épaisseur (mm)
Sika CarboDur S	69	1.1	1.2
CarboDur 30	69	1.1	3
SikaWrap-600 C	69	0.9	0.33
Sikadur-300	69	0.9	1.5



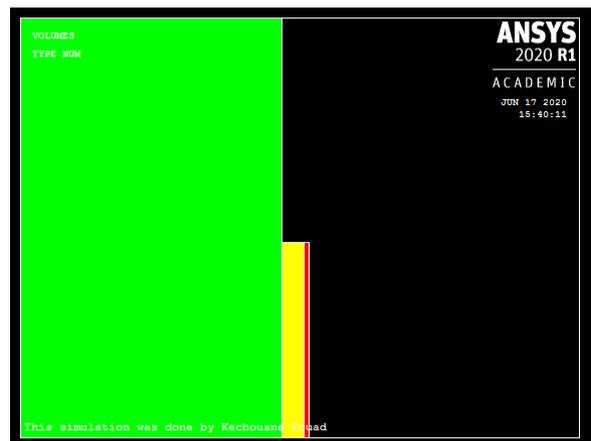
FigureII.25 : Vu(o,yz) du composites



FigureII.26: Vu(o,xz) du composites



FigureII.27 : La résine lamelle.



FigureII.28 : La résine et le tissu

Chapitre III : Résultats et Discussion

Chapitre III : Résultats et discussion

III.1: Introduction

Une analyse modale permet de déterminer les vibrations caractéristiques (modes et fréquences de résonance) d'une structure ou d'un composant d'une machine. Il s'agit de paramètres importants à considérer pour le design d'une structure soumise à des chargements dynamiques, et en particulier à des effets d'amortissement dans un assemblage ou à des effets gyroscopiques pour un composant de machine soumis à des accélérations. On peut citer les exemples de toutes les structures précontraintes ou rotatives, telle qu'une aube de turbine, un instrument de musique ou un pont suspendu. Il faut rappeler qu'une précontrainte de traction contribue à augmenter les fréquences de résonance d'une structure, alors que des états de compression les diminuent.

Lors d'une analyse modale, on calcule les fréquences naturelles circulaires ω_i et la forme des modes propres de vibrations ϕ_i à partir de l'équation :

$$([K] - \omega_i^2 [M]) \{ \phi_i \} = 0$$

Avec $[K]$ et $[M]$ les matrices de rigidité et de masse de la structure. Ces deux matrices sont assumées être constantes, c'est-à-dire que l'on considère[79] :

- Un comportement linéaire élastique des matériaux ;
- La théorie des faibles déformations, sans non-linéarité.

On en déduit les fréquences propres de vibration de la structure $f_i = \omega_i / 2\pi$ (en Hz, c'est-à-dire en cycles/s).

III.2: Différences entre analyse modale et analyse statique

Une analyse de vibrations propre d'une structure est une analyse très similaire à une analyse Linéaire statique, pour ce qui est des étapes de pré-processing.

- ❖ Une analyse modale peut être appliquée à toutes les géométries, c'est-à-dire aussi bien à des corps volumiques que surfaciques ou linéiques. On peut également considérer un point de masse, sans ajouter pour autant de flexibilité à la structure, et donc induire une réduction de ses fréquences propres de vibrations.
- ❖ Aucun effort mécanique ou thermique ne peut être appliqué à la structure dans le cadre d'une analyse modale de vibrations propres. Cependant, la structure peut être ou non contrainte, grâce aux conditions aux limites appliquées, et ce choix va particulièrement affectés les résultats obtenus, aussi bien en termes du calcul des fréquences propres que de la forme des modes de vibrations. Il faut donc être particulièrement attentif à la façon dont on fixe ces conditions aux limites.

- ❖ Le contact peut être considéré dans le cadre d'une analyse modale. Cependant, le contact entre différentes pièces sera considéré dans le cadre d'une analyse linéaire, et donc les surfaces en contact sont considérées sans gap entre elles, et les contacts comme parfaits (pas de séparation possible des surfaces en contact). On peut éventuellement introduire des contacts non linéaires dans le modèle, mais ils seront alors considérés comme libres, c'est-à-dire sans aucune contrainte entre les surfaces (aucun phénomène d'attraction, de mouvements relatifs, etc.).
- ❖ En termes de propriétés des matériaux, une analyse modale requière que l'on renseigne le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et la masse volumique d'où des matériaux considérés.

III.3: Différences entre analyse modale et les autres analyses

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques des types d'analyse :

Tableau III.1: Les types d'analyse

Type d'analyse	Données d'entrée	Données de sortie	Non linéarité
Modale	Aucune	- Fréquences propres de vibration et modes de déformation - Contraintes/déformations	Non
Harmonique	Excitations sinusoïdales sur un intervalle de fréquences	- Réponse sinusoïdale pour chaque fréquence de sollicitation - Réponse min/max pour l'ensemble des fréquences	Non
Spectrale	Spectre représentant la sollicitation en fonction du temps	Réponse maximale du modèle soumis à cette sollicitation dépendant du temps	Non
Aléatoire	Spectre représentant la distribution en termes de probabilité de la sollicitation	Réponses à cette distribution de probabilité de sollicitation	Non
Transitoire	Sollicitations variant dans le temps	Réponse en fonction du temps	Oui

Les structures précontraintes sont particulièrement susceptibles d'entrer en résonance lors de leur utilisation. La modélisation de ces systèmes fera donc intervenir une préanalyse linéaire statique, que l'on couplera à l'analyse modale, la solution de l'analyse structurale statique fournissant alors les conditions initiales de la structure pour l'analyse modale, ce que l'on peut représenter schématiquement de la façon suivante :

Tableau III.2: Schéma l'analyse modale

$[K]\{u_0\} = \{F\}$	→	$[\sigma_0] \Rightarrow [S]$	→	$([K+S] - \omega_i^2 [M])\{\phi_i\} = 0$
Analyse linéaire statique		Calcul de la matrice de rigidité de la structure		Modification de l'équation utilisée pour l'analyse modale

III.4: Résultats obtenus grâce à une analyse modale par ANSYS

Pour ce qui concerne les résultats obtenus grâce à une analyse modale, ANSYS retourne par défaut les fréquences de vibrations propres de la structure. Le calcul de la forme associée à ces différents modes de vibrations (déplacements de la structure, qu'il faudra faire attention à bien considérés comme des valeurs relatives, et non absolues. On doit ensuite être demandé à partir des données générées initialement. On peut réclamer le calcul de grandeurs supplémentaires, telles que les contraintes ou les déformations subies par la structure, mais là encore, il ne s'agira que de valeurs relatives, et non absolues...

Cela permet tout de même de visualiser les zones de la structure qui concentrent les contraintes lorsque la structure est soumise à des vibrations [79]. Par défaut, ANSYS calcule les résultats des 6 premiers modes de vibrations du modèle considéré, nombre que l'on peut modifier. De plus, on peut préciser au logiciel de déterminer les modes de vibrations associés à une certaine gamme de fréquence (par défaut, ANSYS considère un intervalle de 0 Hz à 10Hz).

Les résultats peuvent être présentés sous forme de tableaux ou de graphes de type barre. Par ailleurs, la visualisation des différents modes de vibrations calculés peut être animée. De plus, toujours par défauts, les contraintes et les déformations de la structure causées par ces vibrations propres ne sont pas calculées. On peut cependant demander à les évaluer, tout en prenant en compte que les contraintes sont données sous forme d'une distribution relative des contraintes sur la structure, et non de leurs valeurs réelles.

Par ailleurs, outre les fréquences et les modes de vibrations propres de la structure, une analyse modale permet d'accéder aux facteurs de participation de chacun des modes de Vibration [79].

III.5: Résultats numériques du modèle choisi

III.5.1: Modélisation de pont sans renforcement

L'analyse modale du modèle calibré a conduit à l'obtention des paramètres modaux de la structure du pont étudié. Les fréquences modales de l'analyse par la méthode des éléments finis fournies par ANSYS sont données dans le tableau III.5.1, avec les formes des modes correspondantes illustrées dans les figures III.5.1.

Tableau III.3: Valeurs des fréquences obtenues par ANSYS

MOD	FREQ (HZ)	Periode(s)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	3,0677	0,32597712	1	1	1
2	3,1361	0,31886738	1	2	2
3	3,4755	0,28772838	1	3	3
4	3,5174	0,2843009	1	4	4
5	3,8564	0,2593092	1	5	5
6	4,2002	0,2380839	1	6	6
7	4,3025	0,23242301	1	7	7
8	4,8204	0,20745166	1	8	8
9	5,3454	0,18707674	1	9	9
10	5,759	0,17364126	1	10	10

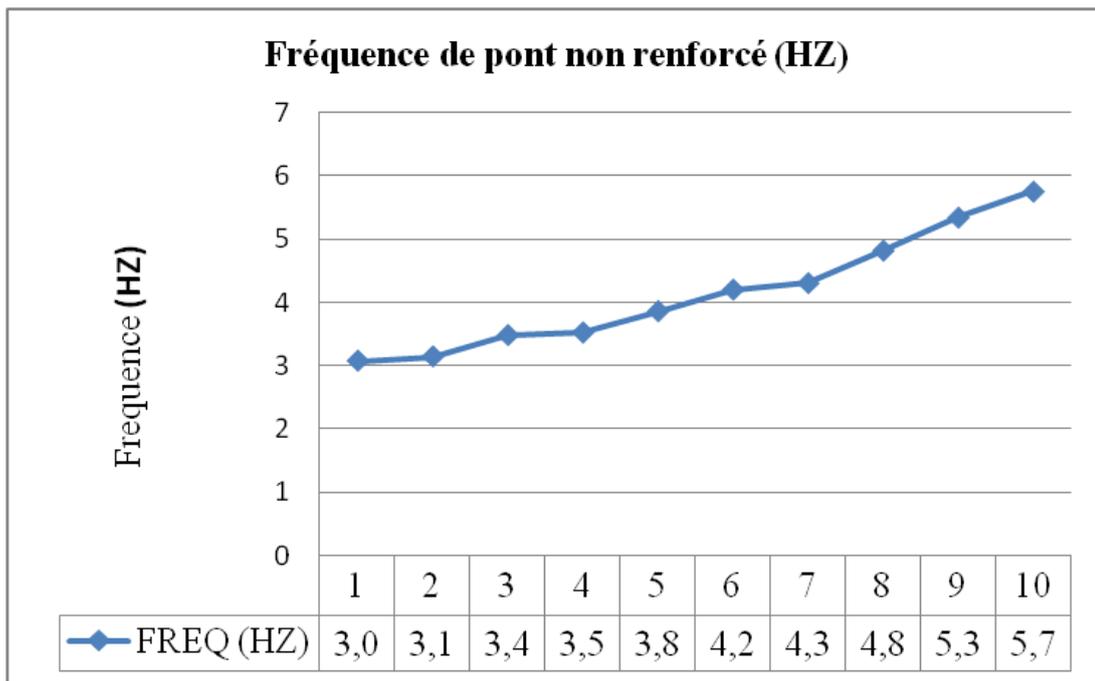


Figure III.1 : Courbe des fréquences de pont renforcé par M.C traditionnels

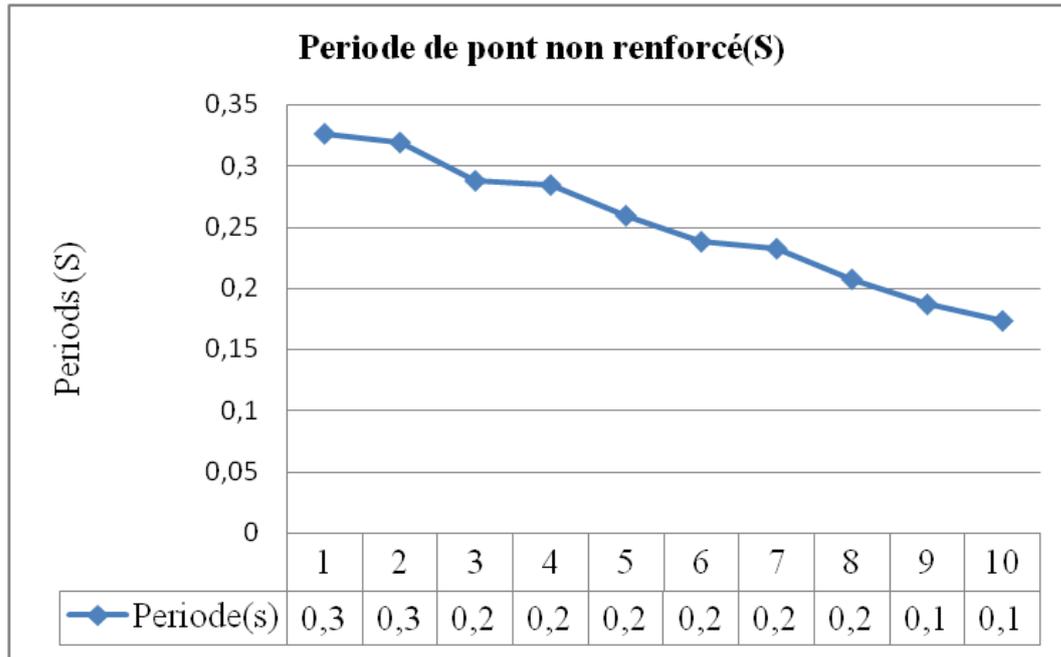
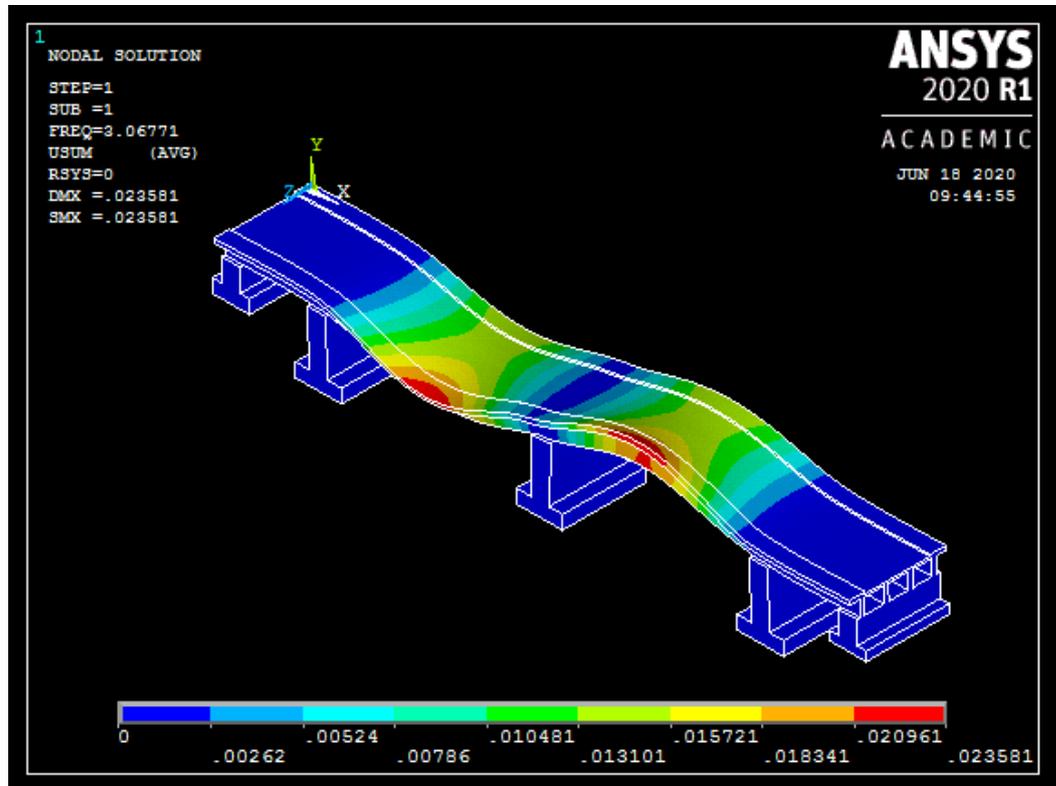
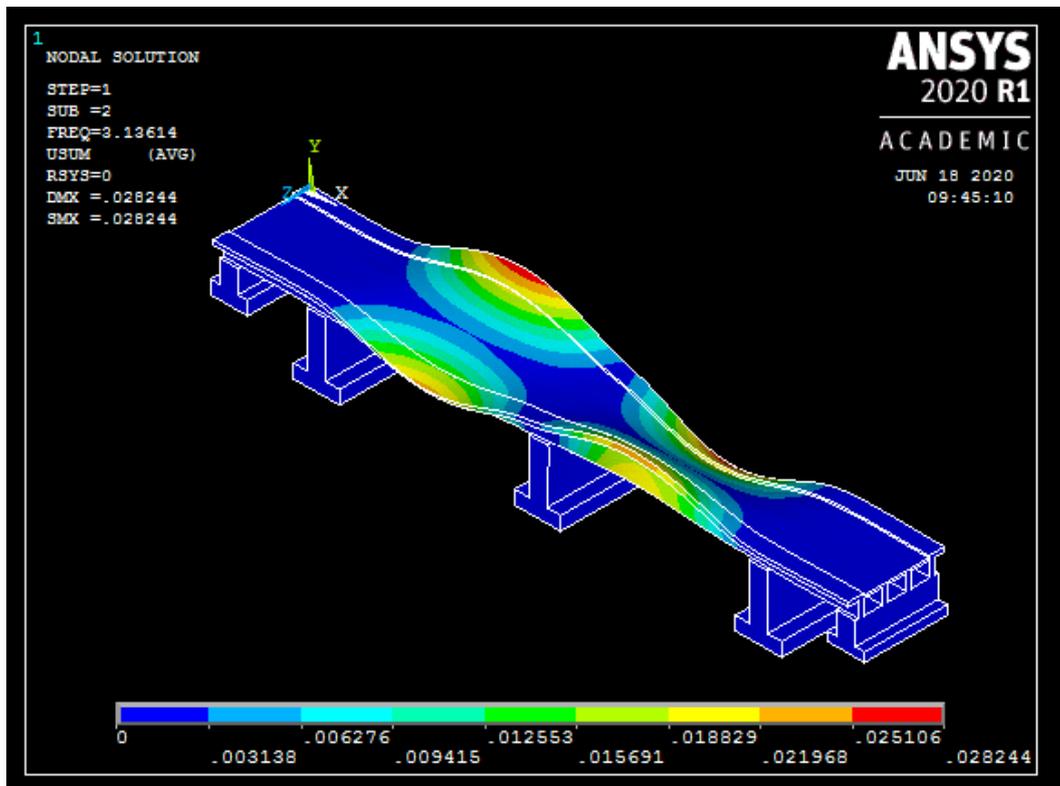


Figure III.2 : Courbe des périodes de pont renforcé par M.C traditionnels

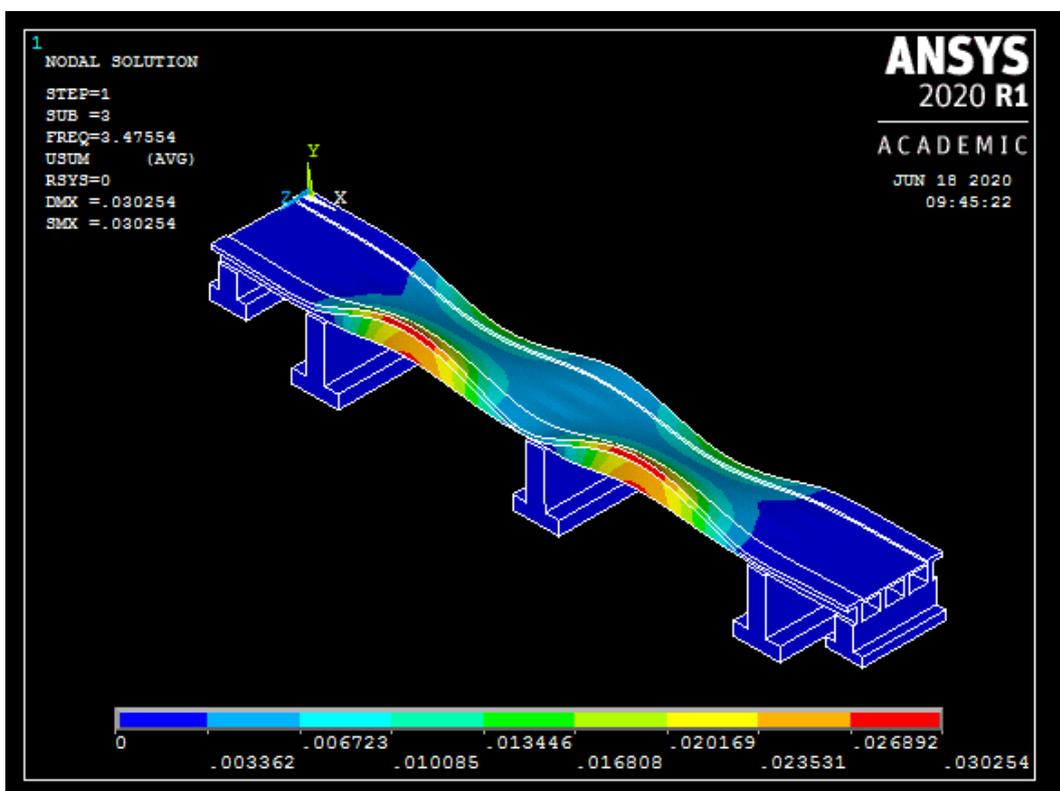
***Les modes propres de vibration du l'ouvrage par éléments finis**



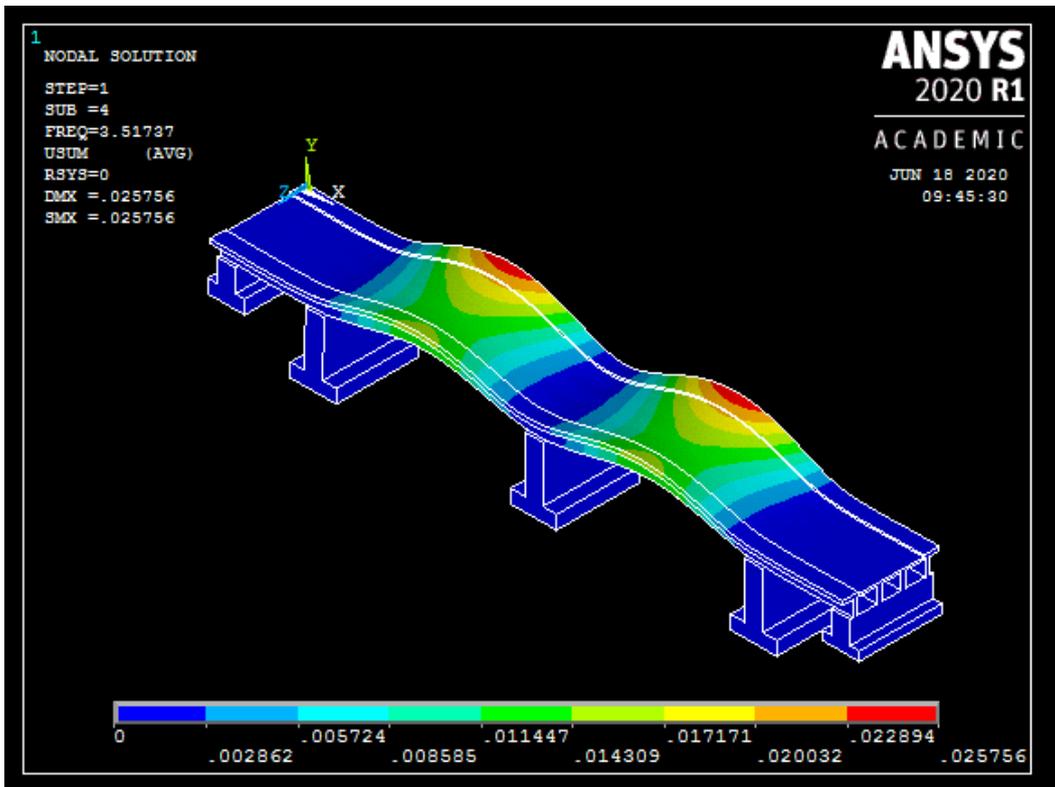
FigureIII.3: Model 1.Translation longitudinale(N)



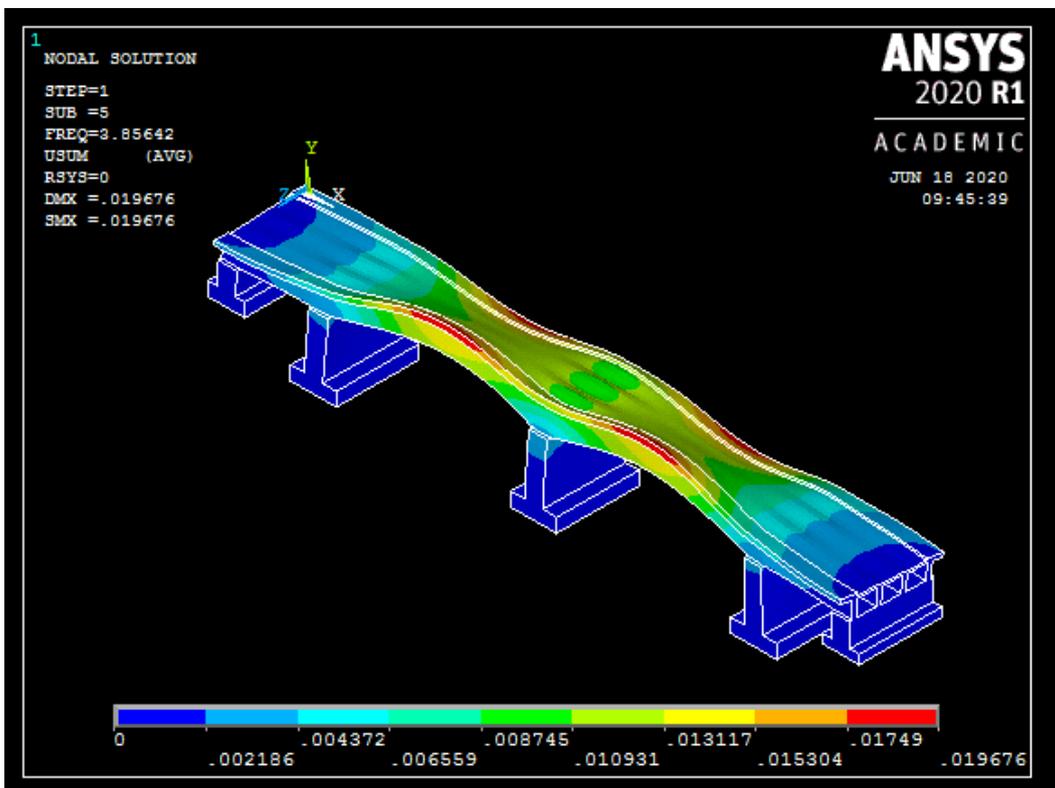
FigureIII.4 : Mode 2. Premier fléchissement vertical(Y)



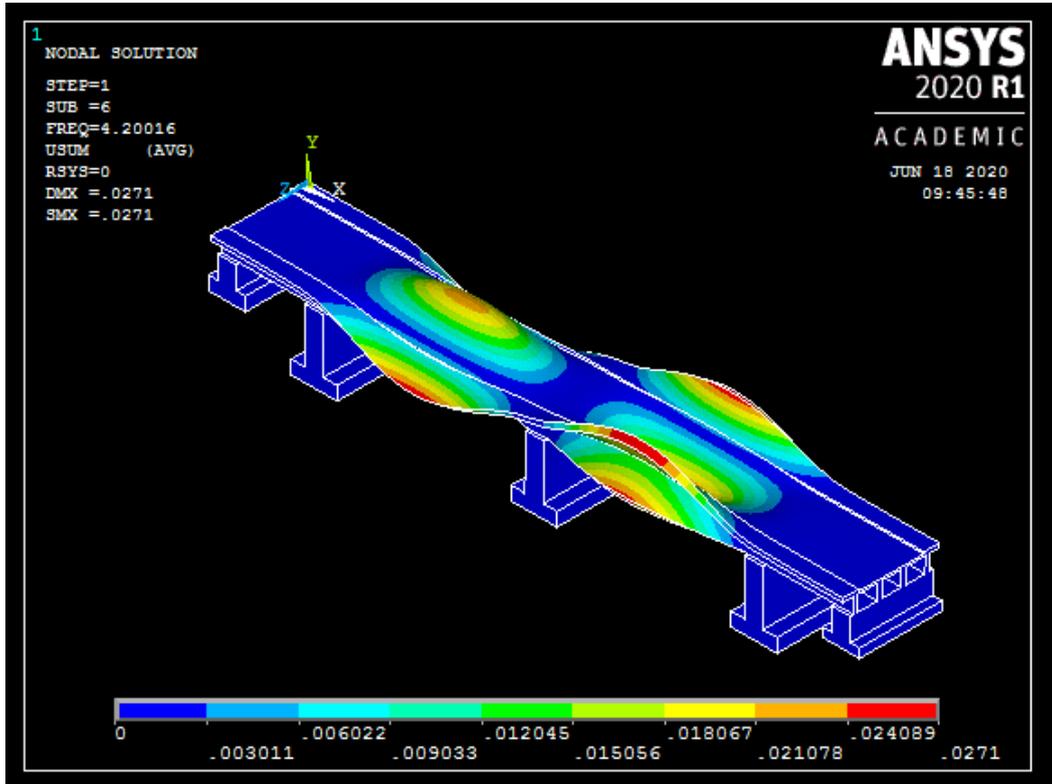
FigureIII.5 : Mode 3. Torsion simple



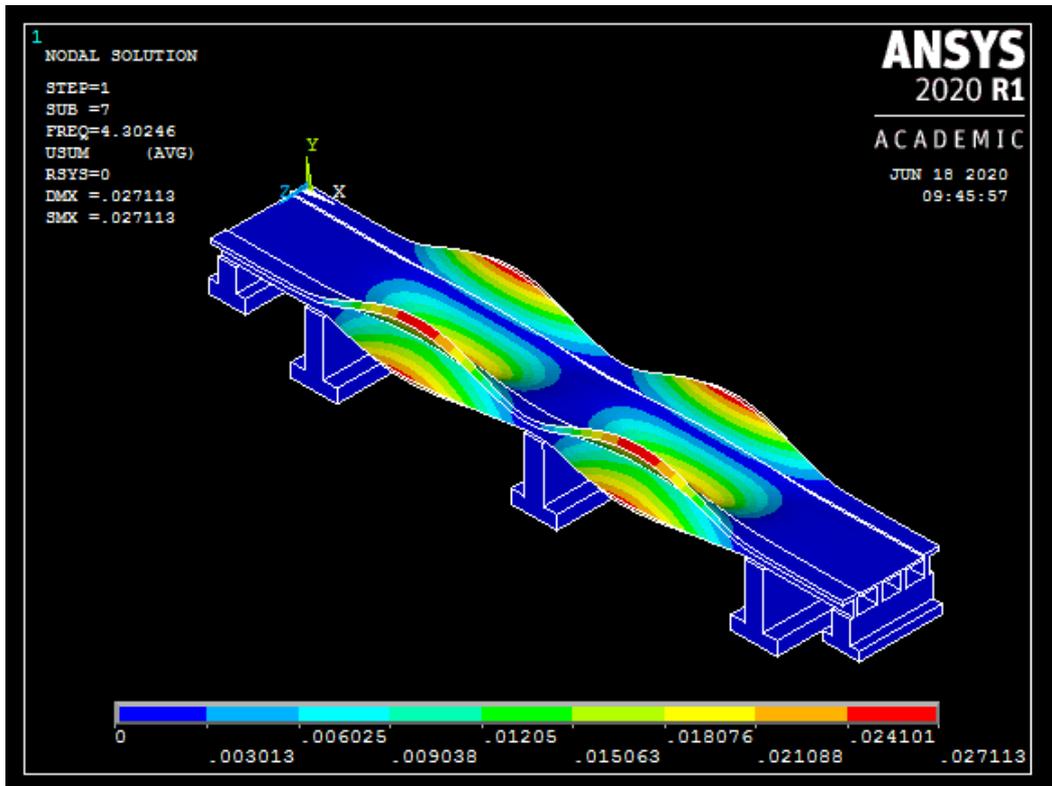
FigureIII.6 : Mode 4. Deuxième fléchissement vertical(Y)



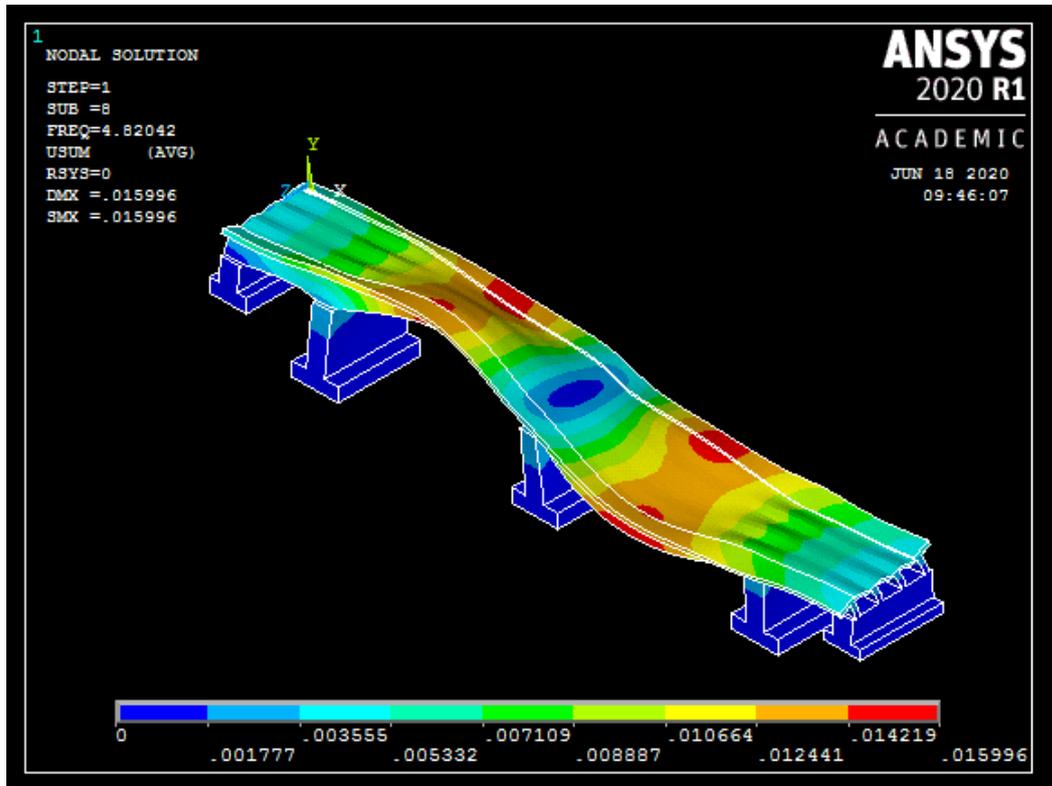
FigureIII.7 : Mode 5. Double torsion du tablier



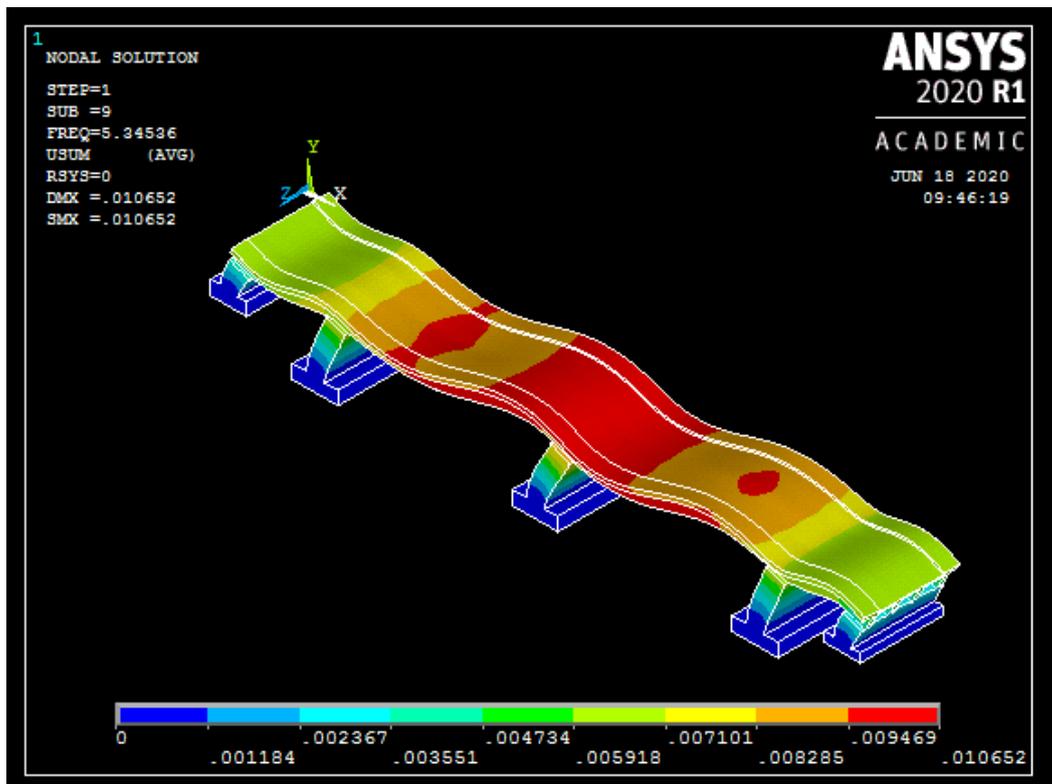
FigureIII.8 : Mode 6. Translation latérale (E)



FigureIII.9 : Mode 7. Translation latérale (E)



FigureIII.10 : Mode 8. Fléchissement fort



FigureIII.11 : Mode 9. Translation latérale (E)

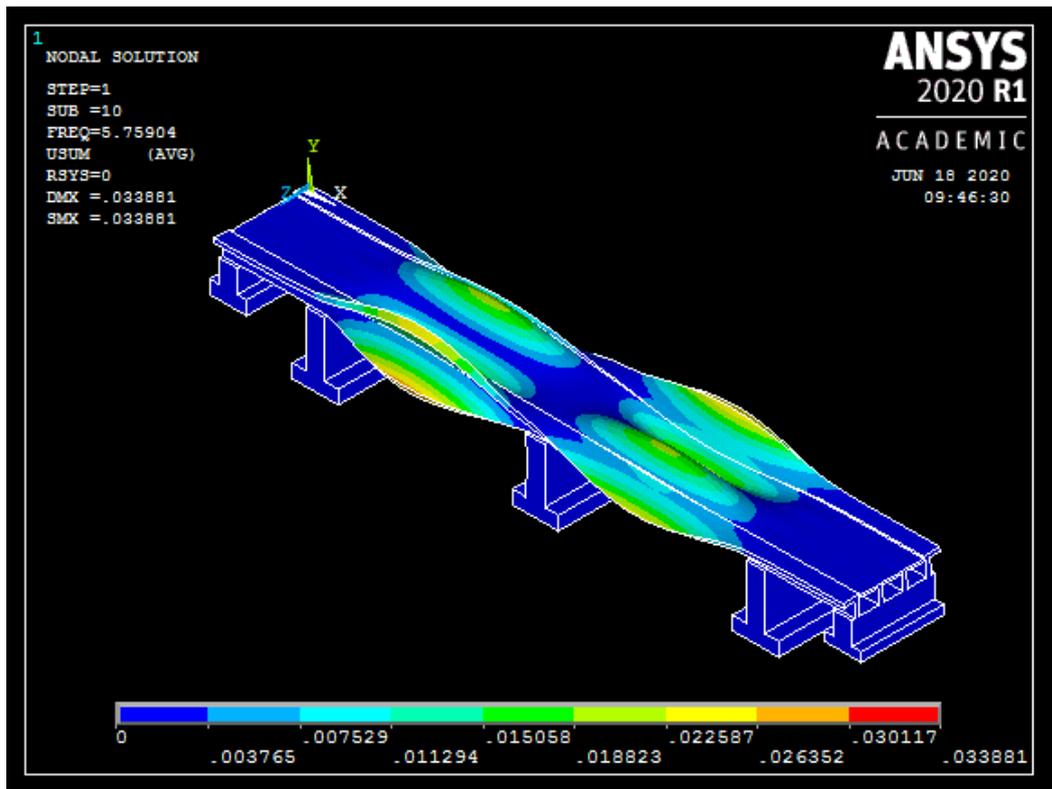


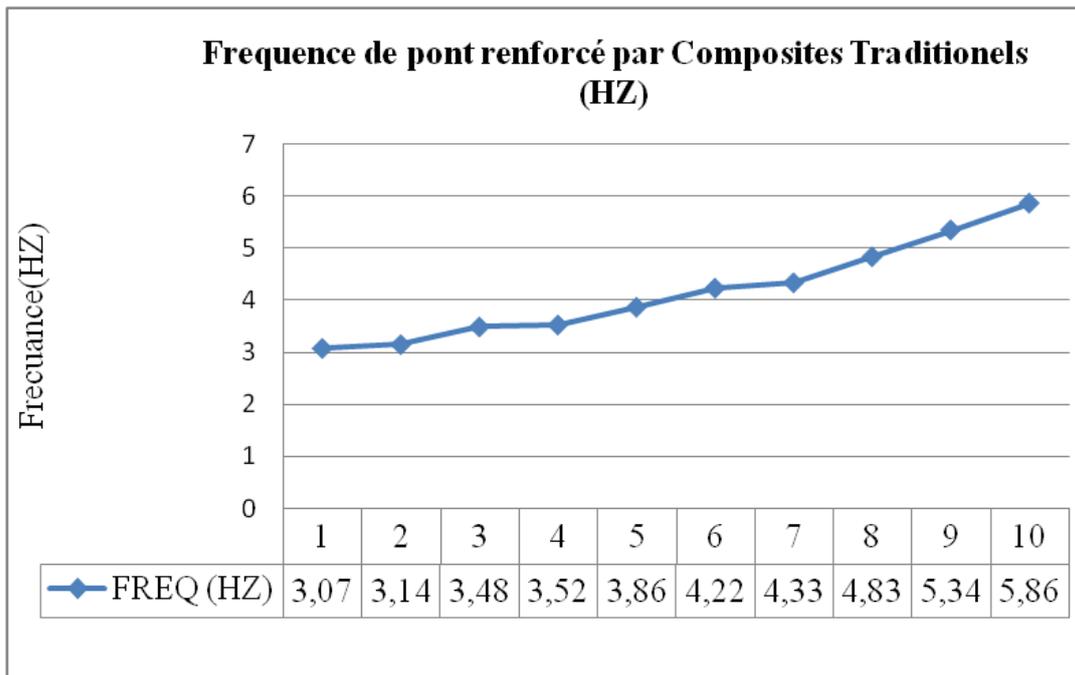
Figure III.12 : Mode 10. Translation latérale (E)

III.5.2: Modélisation de pont renforcé par matériaux composites traditionnels

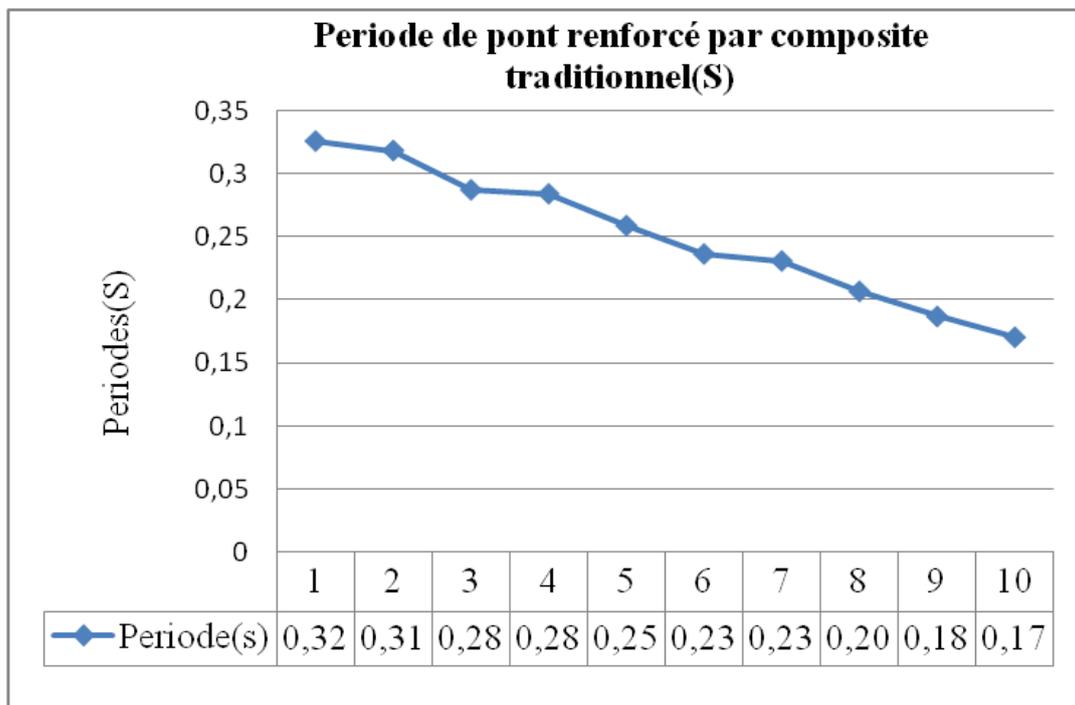
L'analyse modale du modèle calibré a conduit à l'obtention des paramètres modaux de la structure du pont étudié. Les fréquences modales de l'analyse par la méthode des éléments finis fournies par ANSYS sont données dans le tableau III.5.2, avec la courbe des fréquences et des périodes de pont renforcé par M.C traditionnels

Tableau III.4: Valeurs des fréquences obtenues par ANSYS

MOD	FREQ (HZ)	Periode(s)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	3,0703	0,32570107	1	1	1
2	3,1419	0,31827875	1	2	2
3	3,4822	0,28717477	1	3	3
4	3,5209	0,28401829	1	4	4
5	3,8625	0,25889968	1	5	5
6	4,2291	0,23645693	1	6	6
7	4,3318	0,23085092	1	7	7
8	4,8331	0,20690654	1	8	8
9	5,3476	0,18699978	1	9	9
10	5,8625	0,17057569	1	10	10

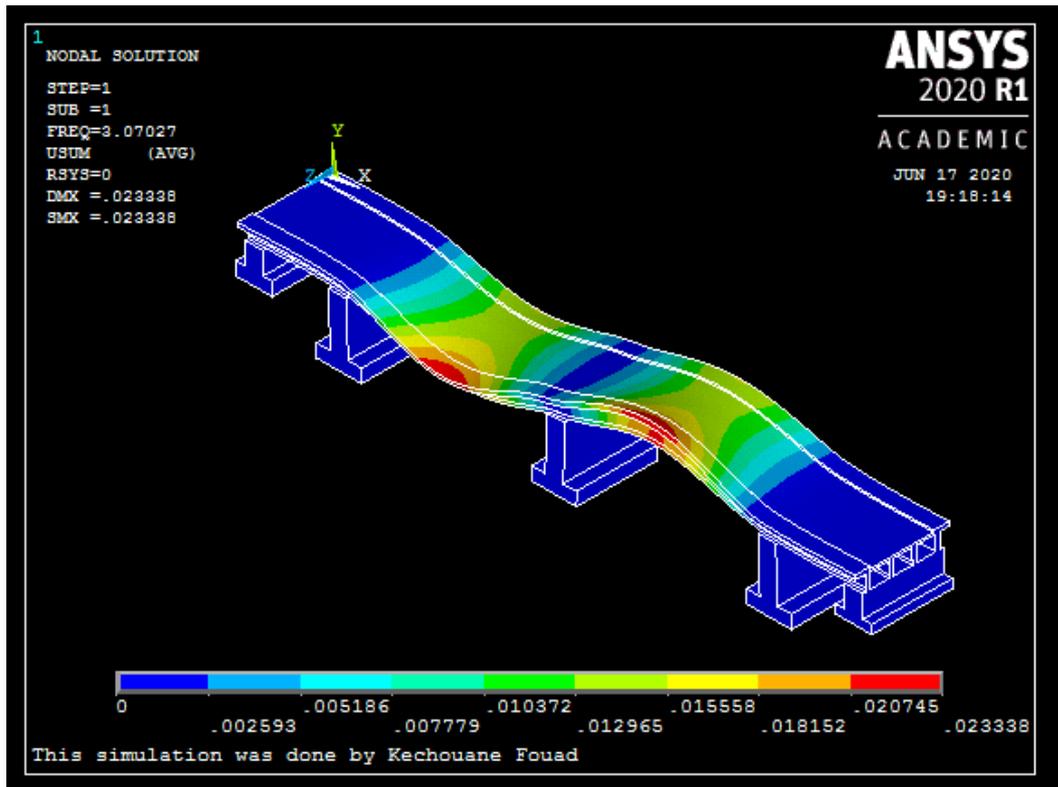


FigureIII.13 : Courbe des fréquences de pont renforcé par M.C traditionnels

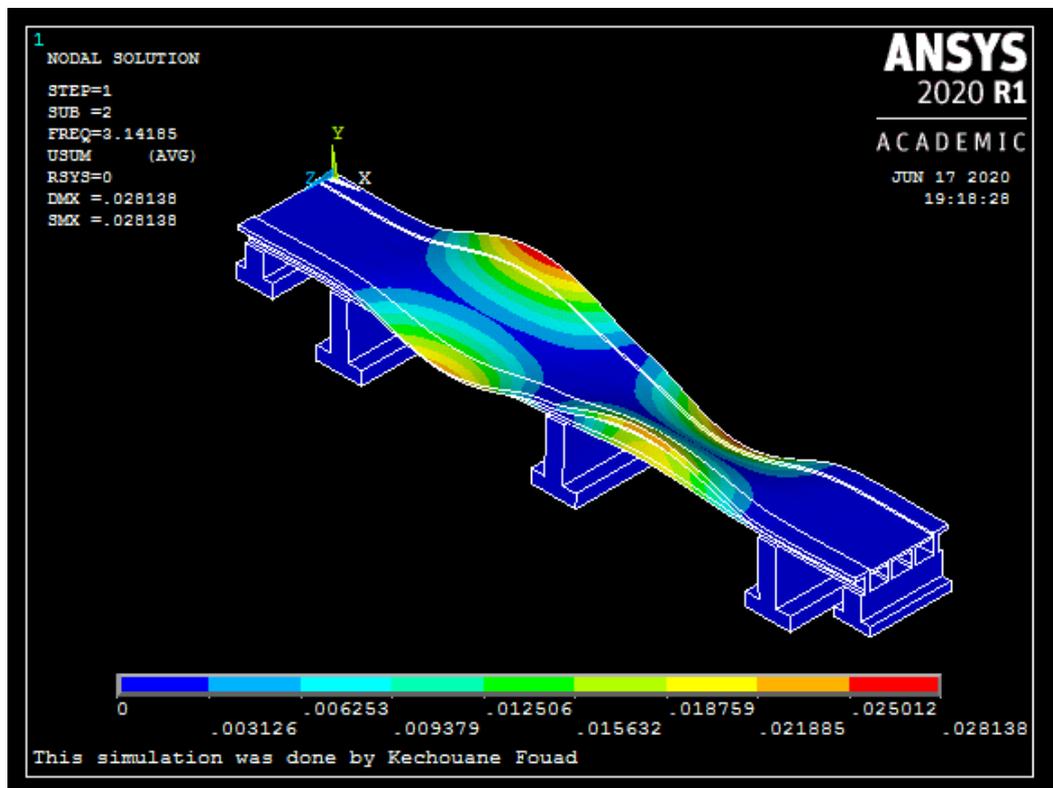


FigureIII.14 : Courbe des périodes de pont renforcé par M.C traditionnels

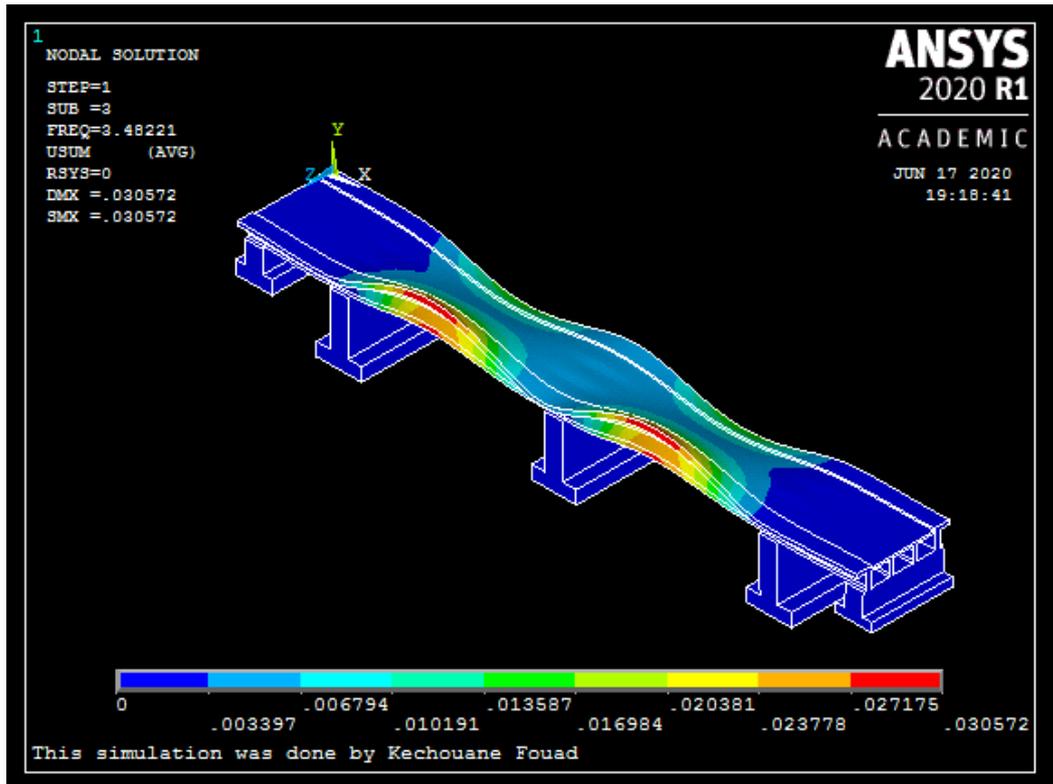
*Les modes propres de vibration du l'ouvrage par éléments finis



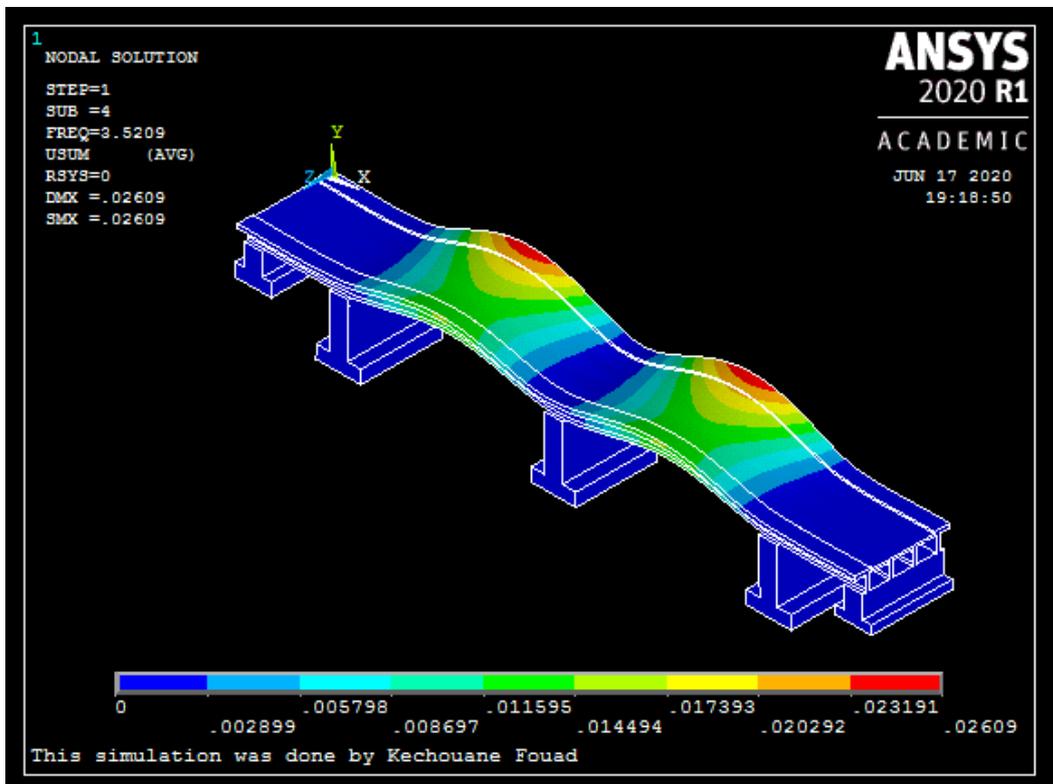
FigureIII.15: Model 1. Translation longitudinale(N)



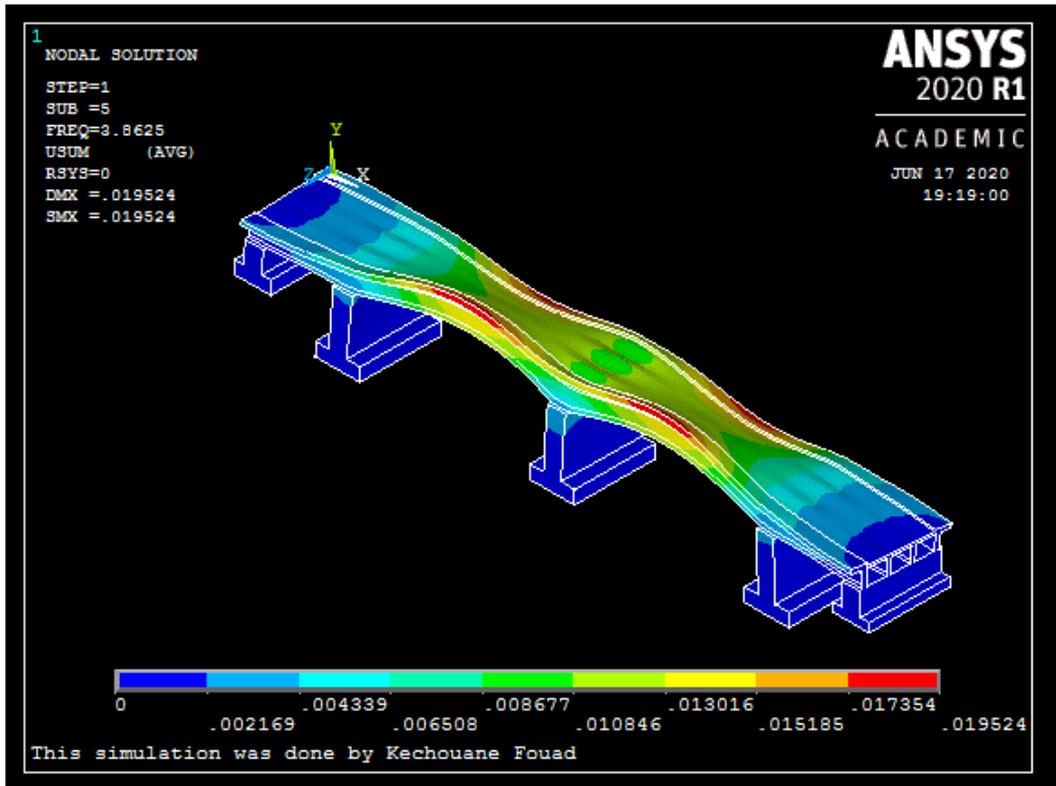
FigureIII.16 : Mode 2. Premier fléchissement vertical(Y)



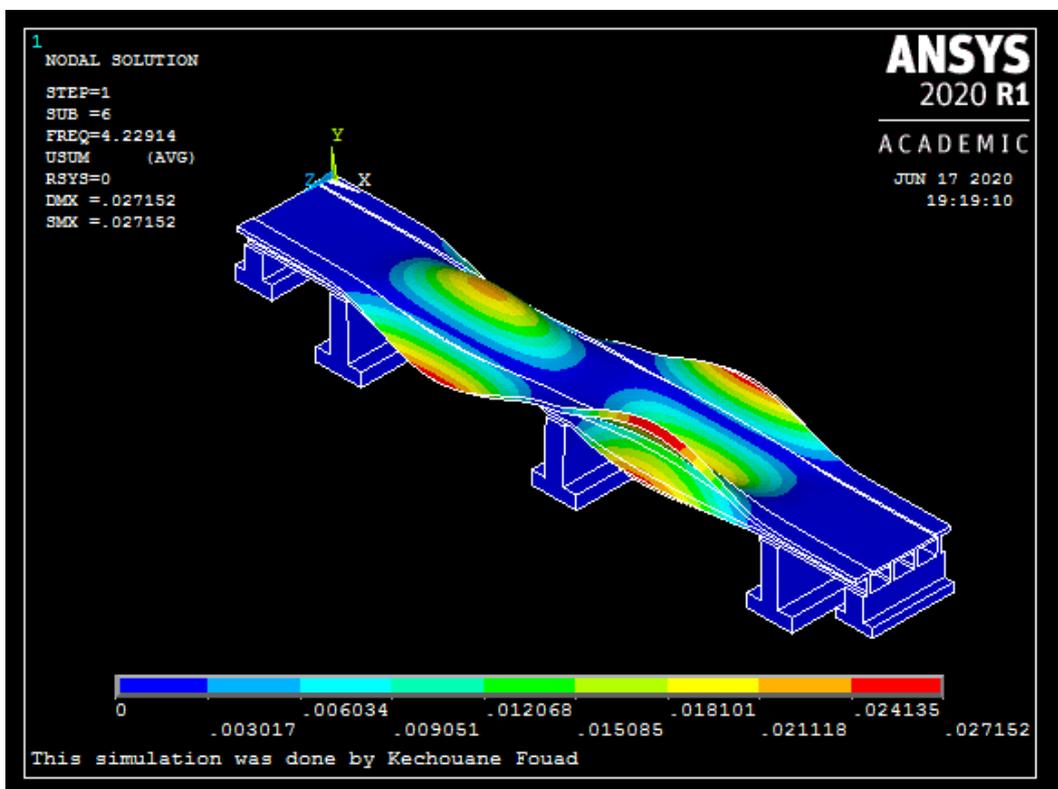
FigureIII.17 : Mode 3. Torsion simple



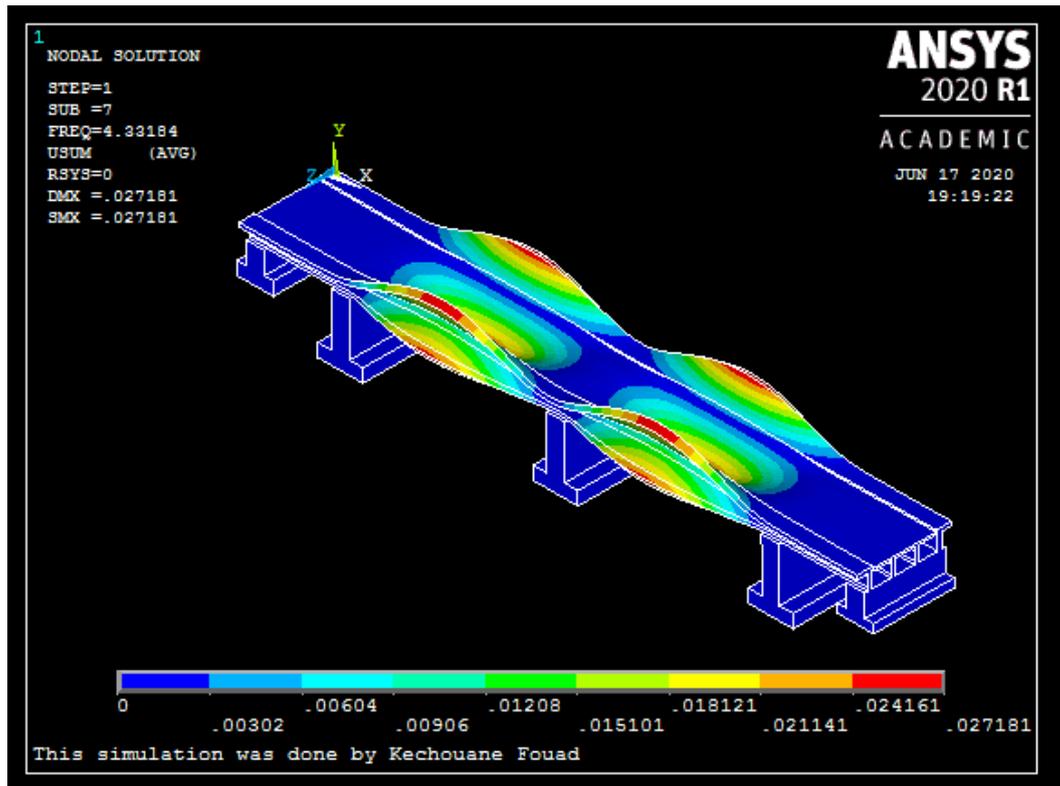
FigureIII.18 : Mode 4. Deuxième fléchissement vertical(Y)



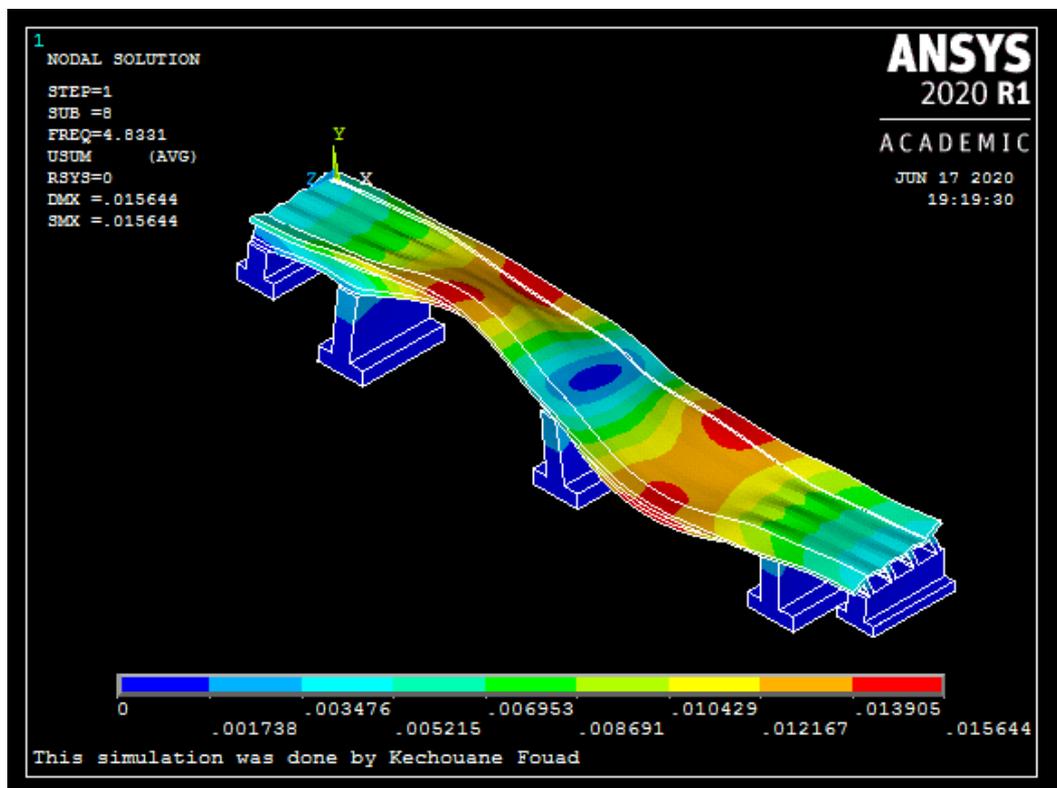
FigureIII.19 : Mode 5. Double torsion du tablier



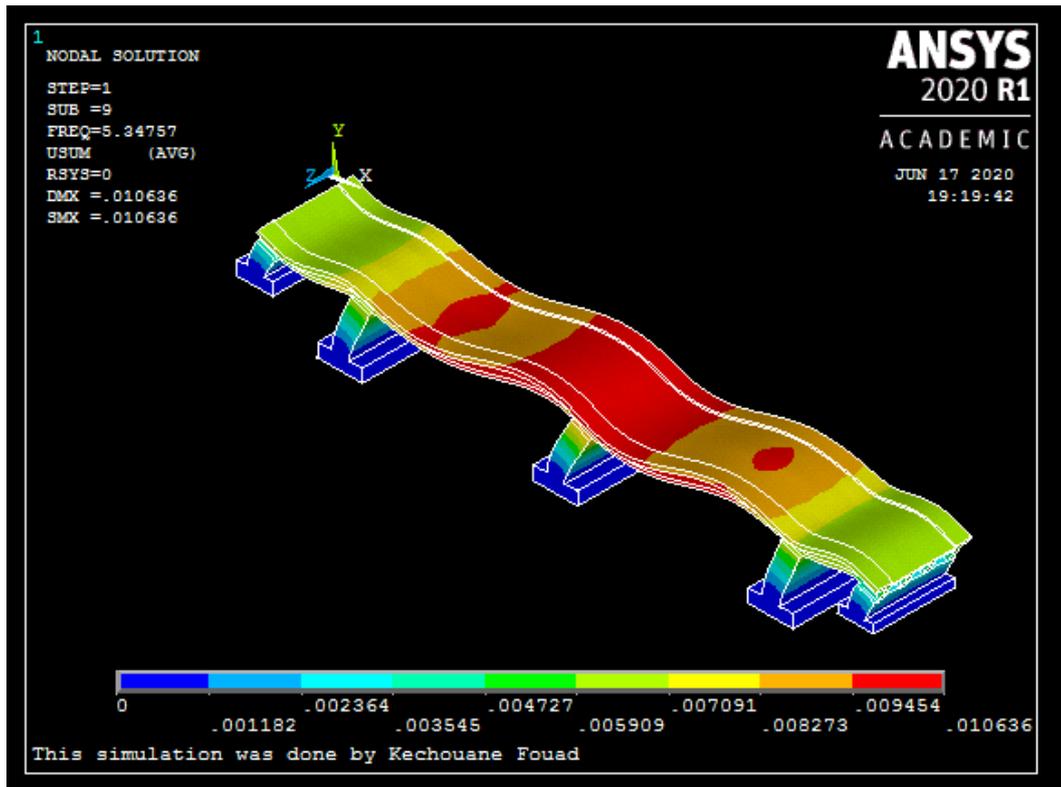
FigureIII.20 : Mode 6. Translation latérale (E)



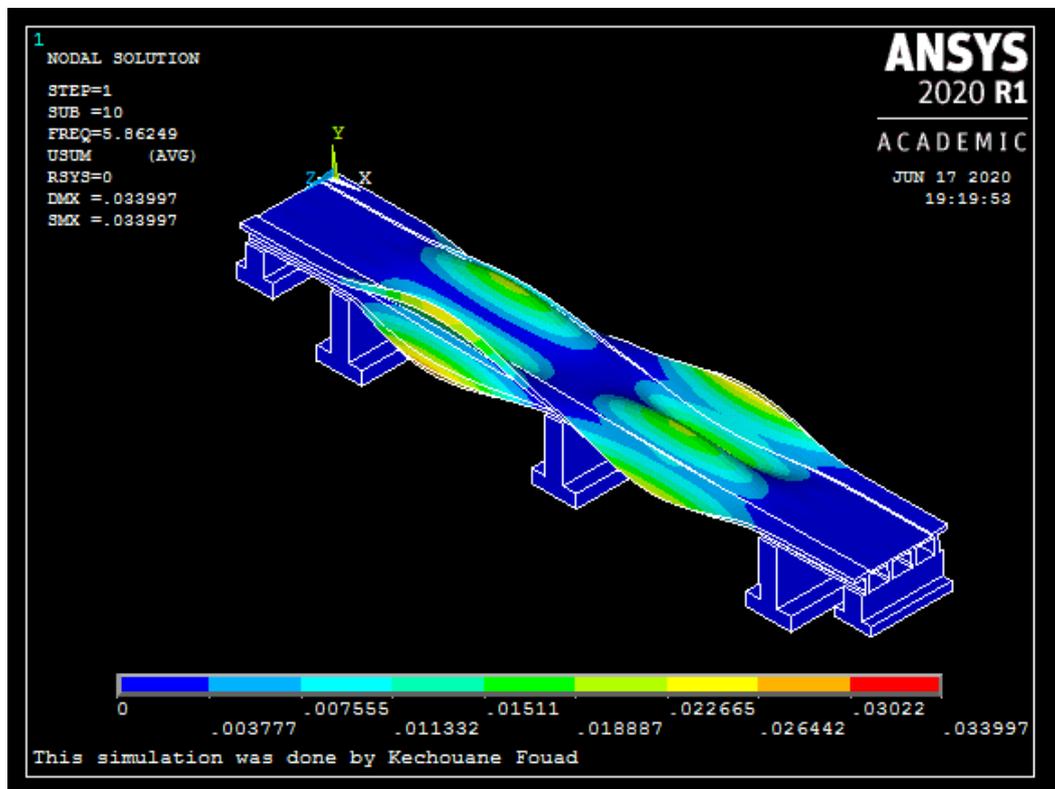
FigureIII.21 : Mode 7. Translation latérale (E)



FigureIII.22 : Mode 8. Translation latérale (E)



FigureIII.23 : Mode 9. Translation latérale (E)



FigureIII.24 : Mode 10. Translation latérale (E)

III.5.3: Modélisation de pont avec insertion des nano composites.

L'analyse modale du modèle calibré a conduit à l'obtention des paramètres modaux de la structure du pont étudié. Les fréquences modales de l'analyse par la méthode des éléments finis fournies par ANSYS sont données dans le tableau III.5.3, avec les formes des modes correspondantes illustrées dans les figures III.5.3.

Tableau III.5: Valeurs des fréquences obtenues par ANSYS

MOD	FREQ (HZ)	Periode(s)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	3,0711	0,32561623	1	1	1
2	3,143	0,31816736	1	2	2
3	3,4836	0,28705936	1	3	3
4	3,522	0,28392959	1	4	4
5	3,8642	0,25878578	1	5	5
6	4,2356	0,23609406	1	6	6
7	4,3384	0,23049972	1	7	7
8	4,8366	0,20675681	1	8	8
9	5,3487	0,18696132	1	9	9
10	5,8866	0,16987735	1	10	10

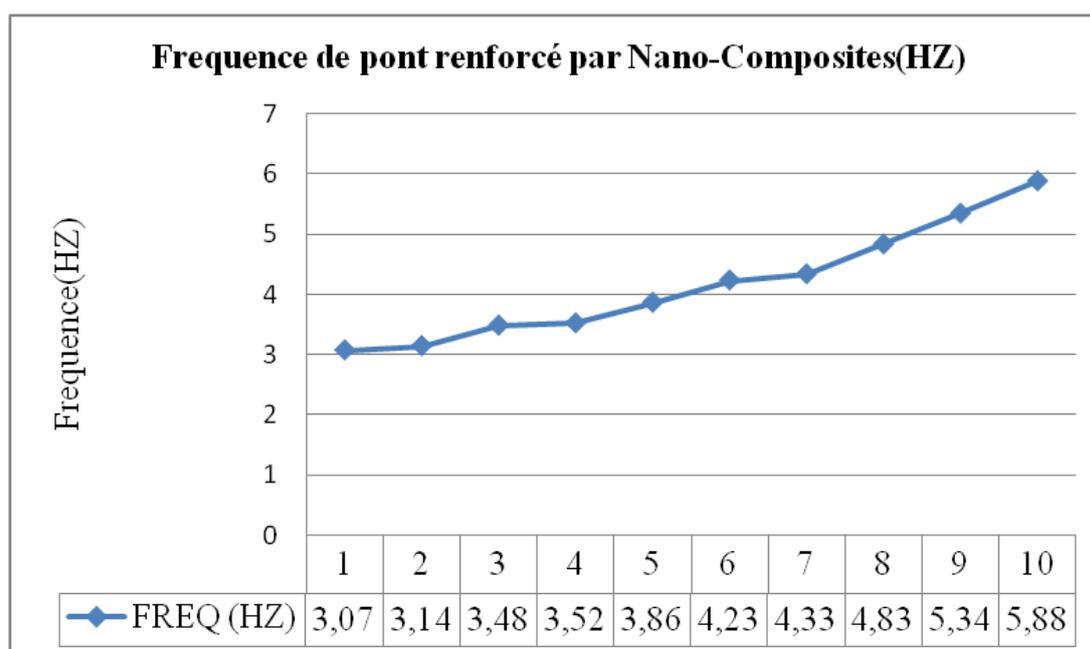
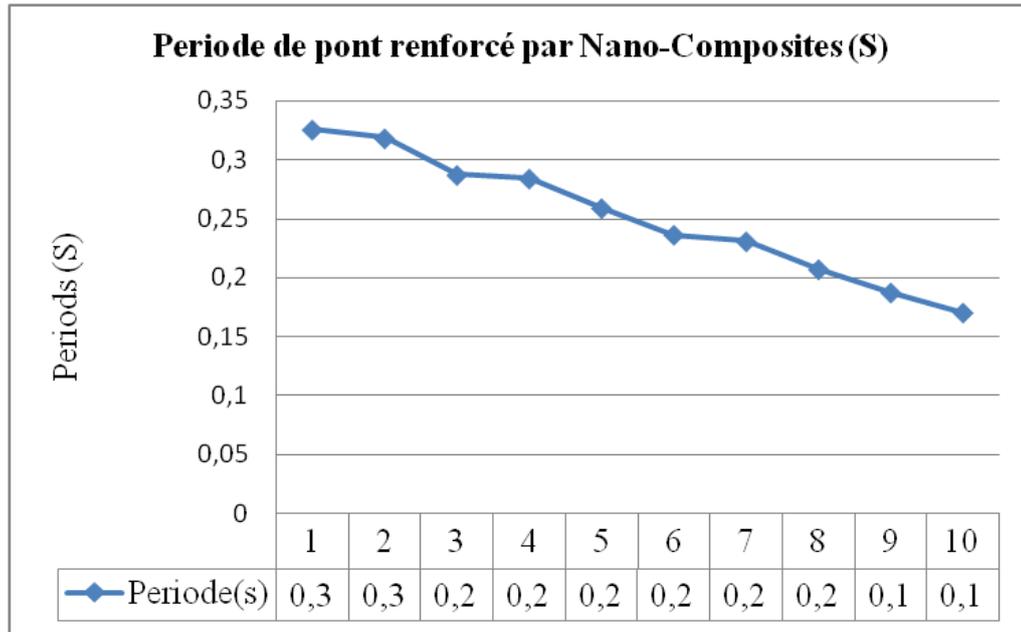
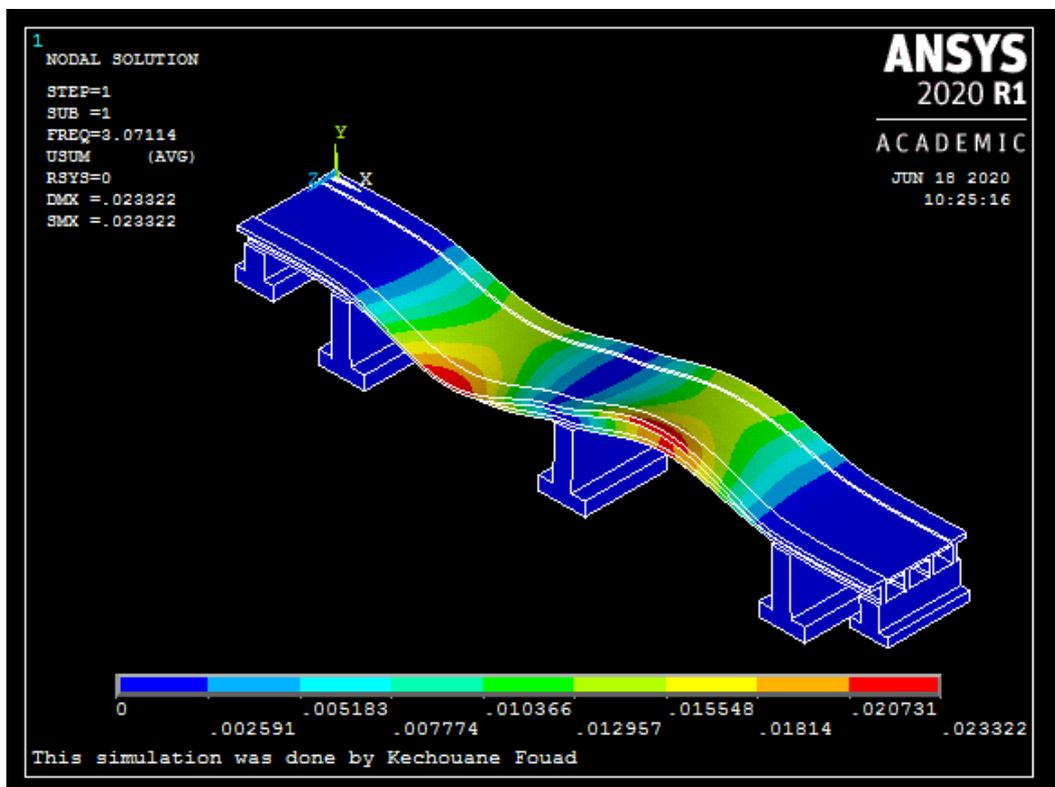


Figure III.25 : Courbe des fréquences de pont renforcé par nano composites.

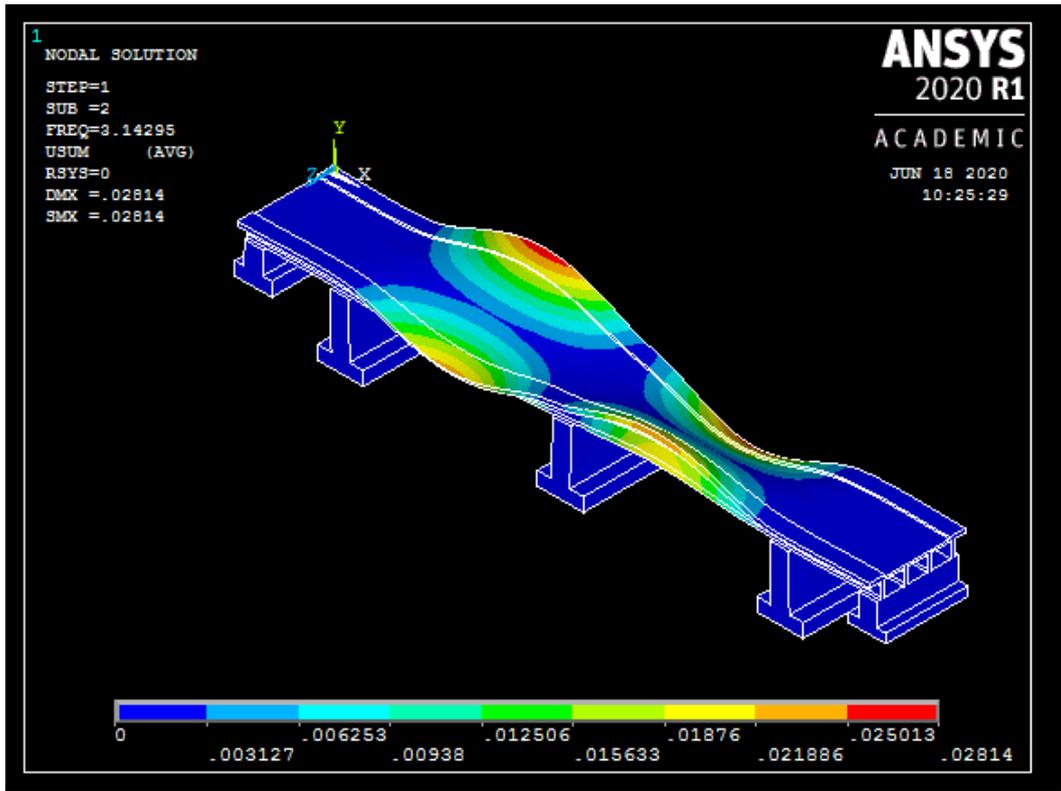


FigureIII.26 : Courbe des périodes de pont renforcé par nano composites.

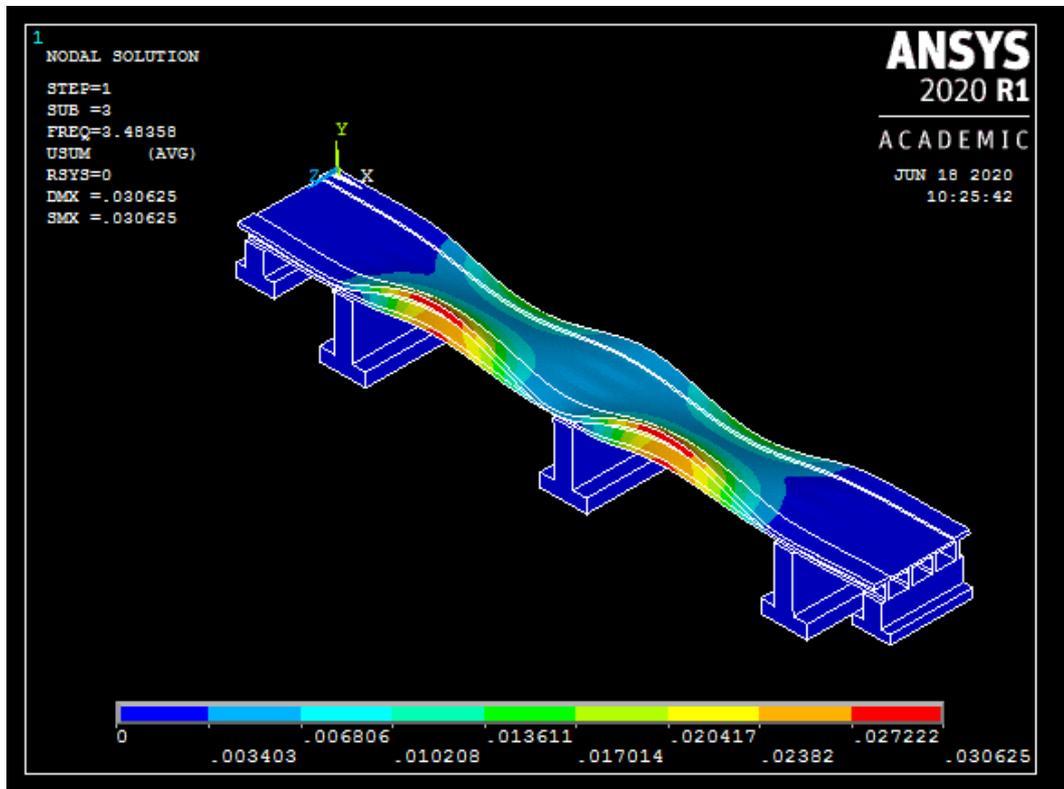
***Les modes propres de vibration du l'ouvrage par éléments finis**



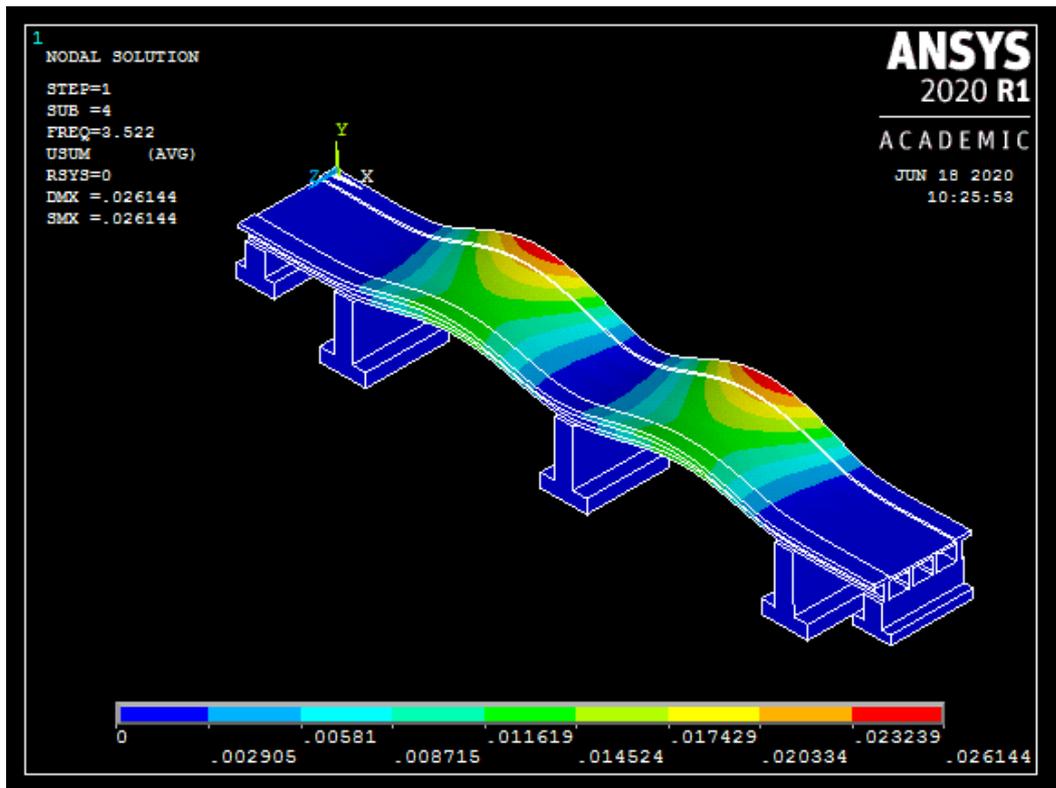
FigureIII.27: Model 1. Translation longitudinale(N)



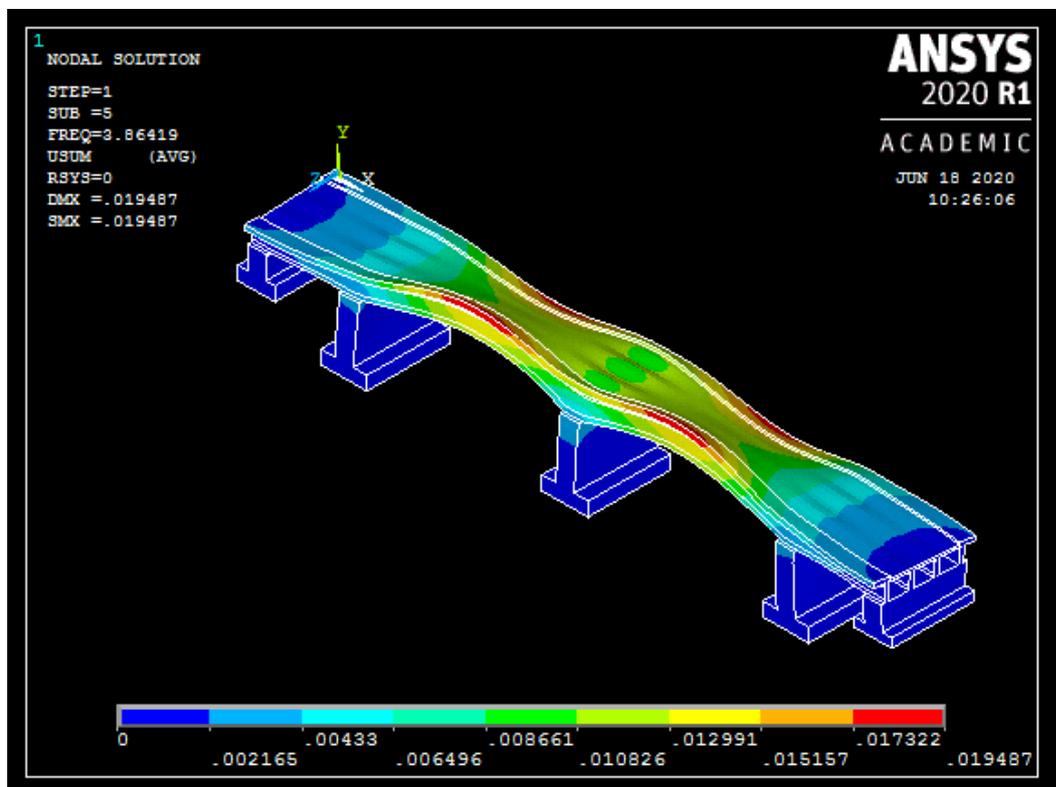
FigureIII.28 : Mode 2. Premier fléchissement vertical(Y)



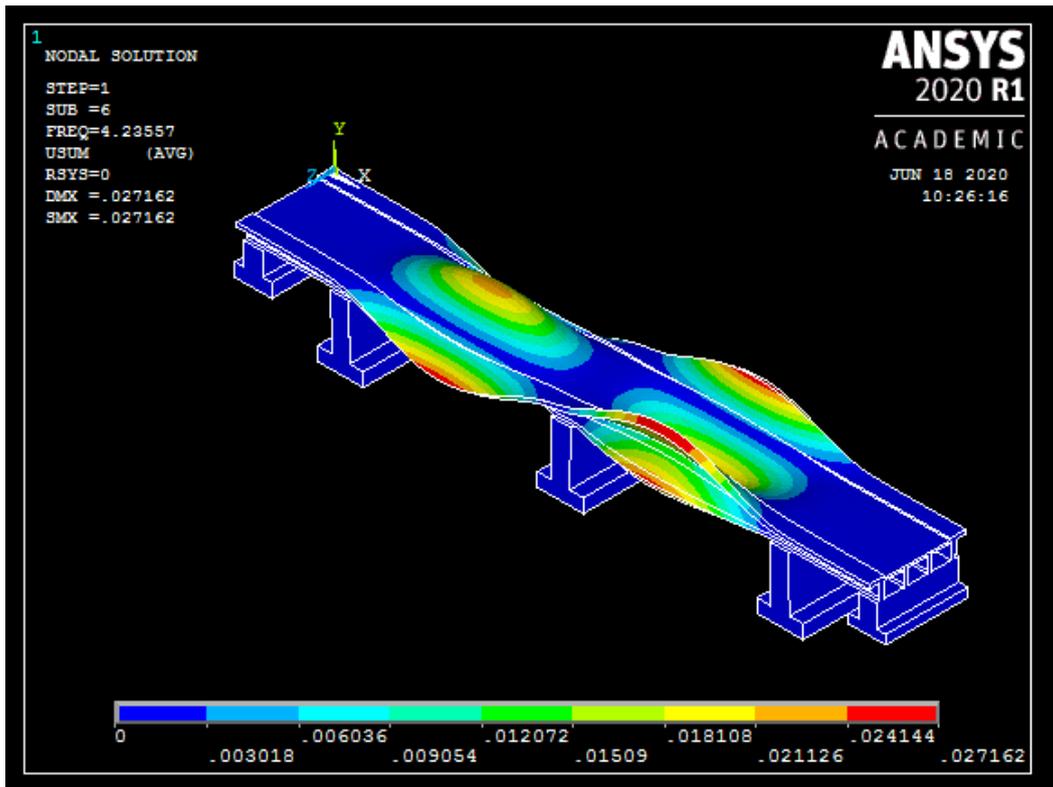
FigureIII.29 : Mode 3. Torsion simple



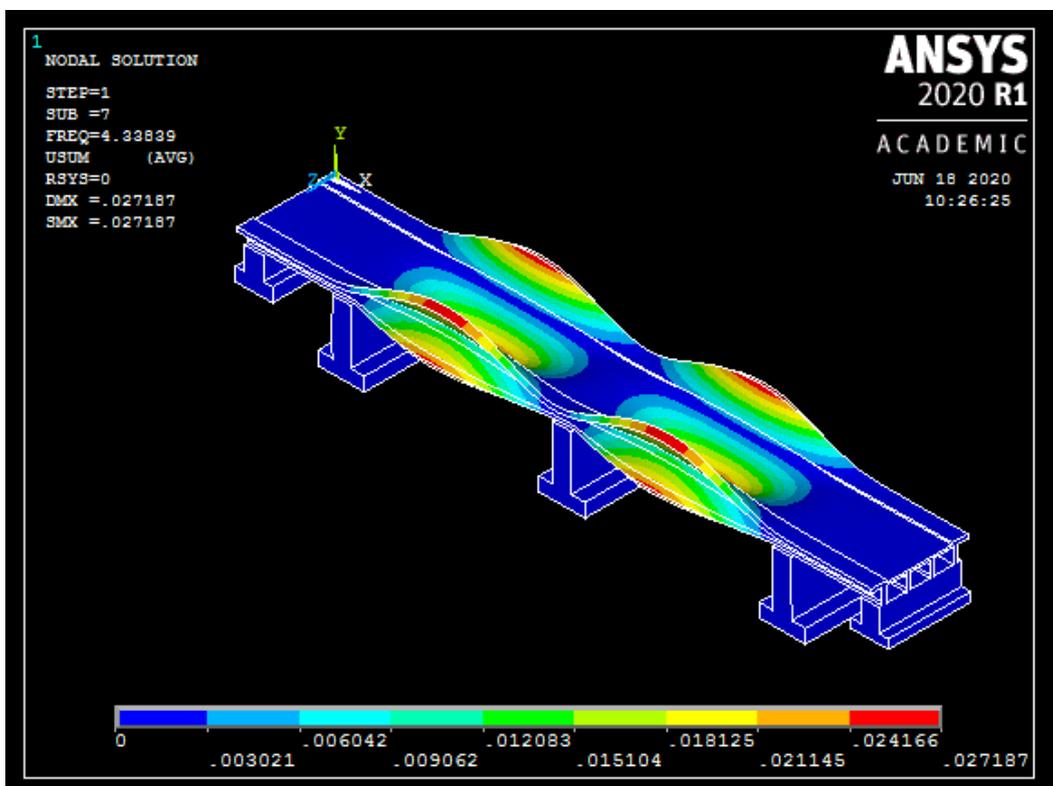
FigureIII.30 : Mode 4. Deuxième fléchissement vertical(Y)



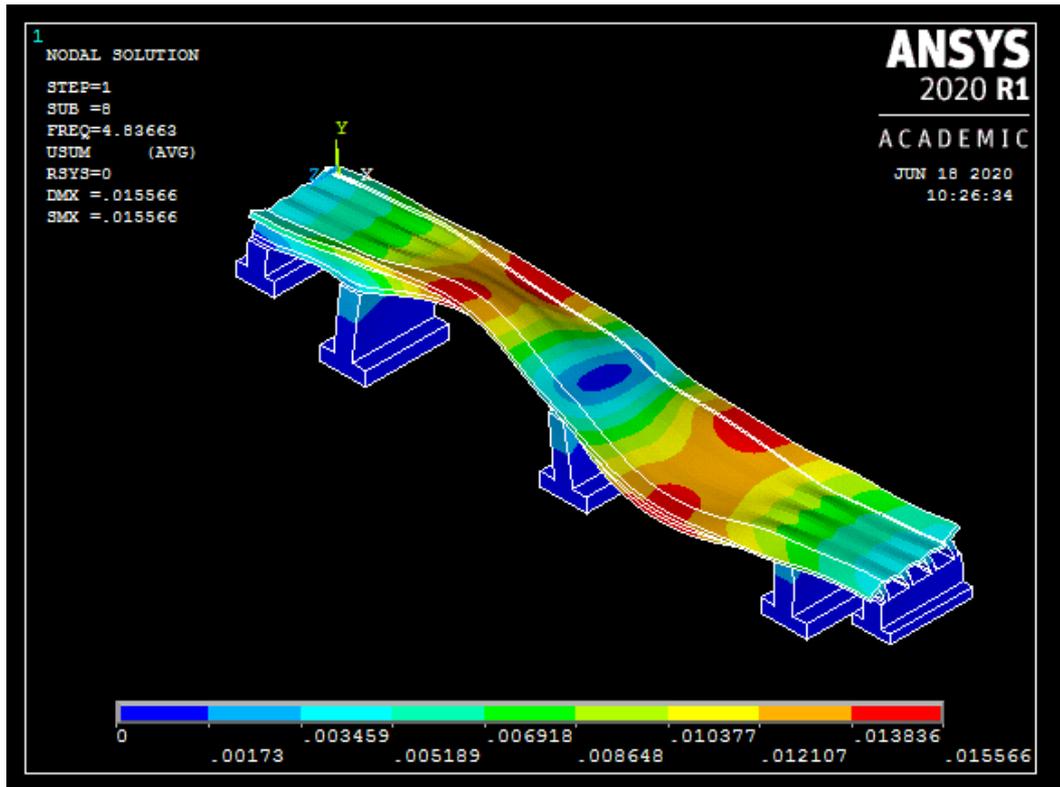
FigureIII.31 : Mode 5. Double torsion du tablier



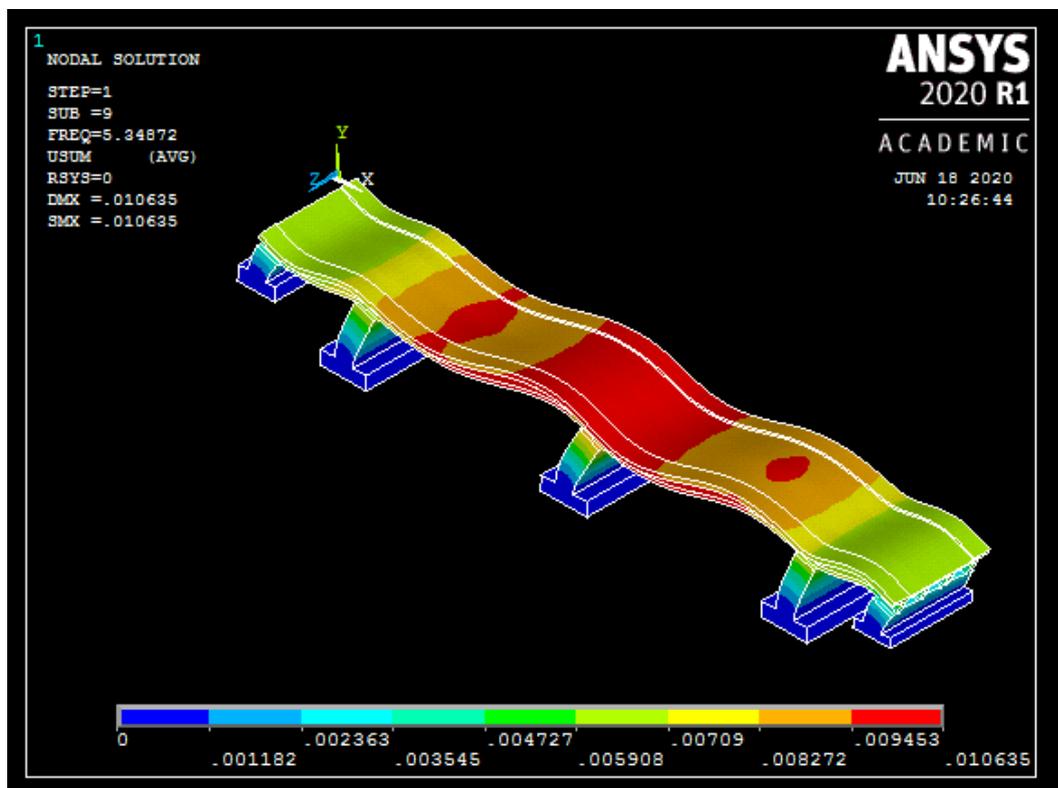
FigureIII.32 : Mode 6. Translation latérale (E)



FigureIII.33 : Mode 7. Translation latérale (E)



FigureIII.34 : Mode 8. Translation latérale (E)



FigureIII.35 : Mode 9. Translation latérale (E)

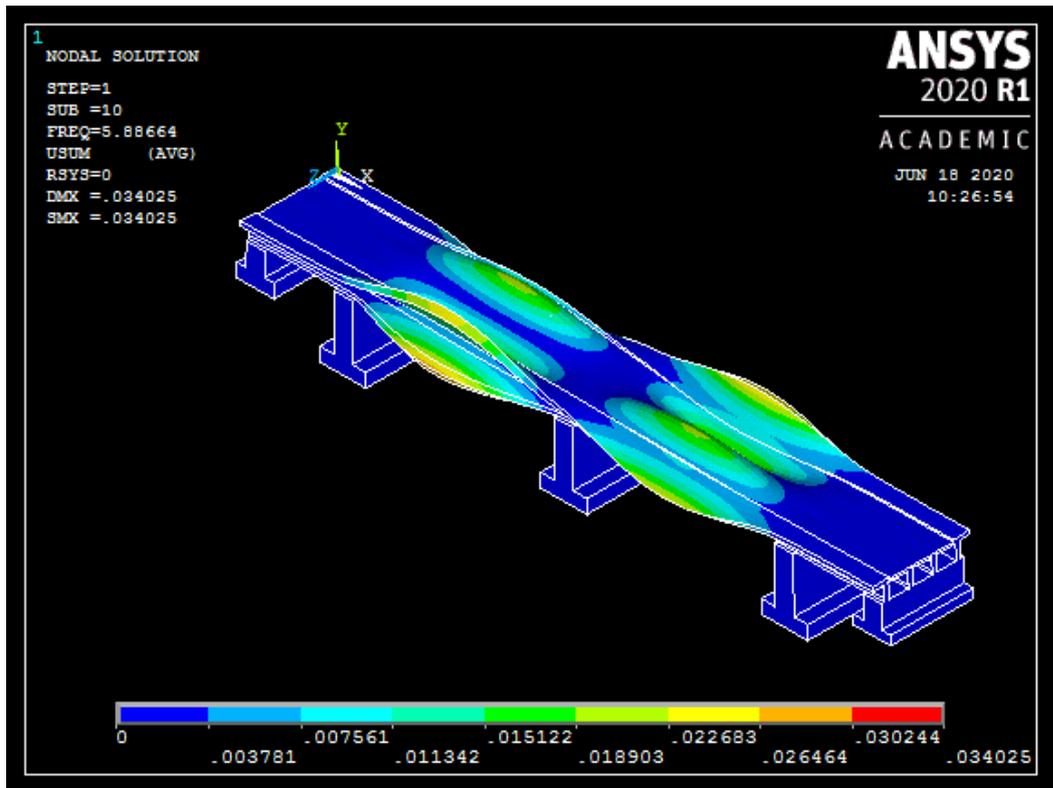


Figure III.36 : Mode 10. Translation latérale (E)

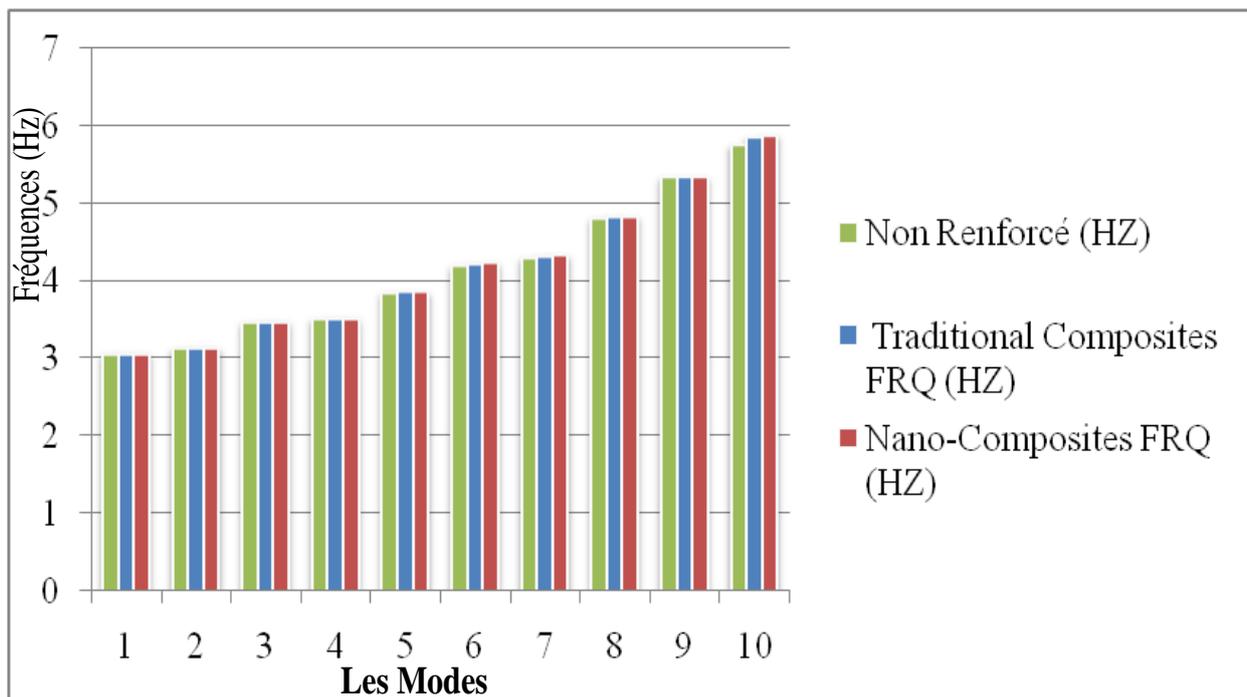
III.6-Comparaison et commentaires

Le tableau V.6 présente une comparaison sommaire des valeurs numériques des fréquences et des périodes obtenir par la modélisation en élément finis de pont avec des Trois cas de simulation étudiés (modélisation de pont sans renforcement, modélisation de pont par matériaux composites traditionnels et modélisation de pont renforcé avec nano composites)

Tableau III.6 : Comparaison sommaire des valeurs du fréquences de 3 cas étudiés

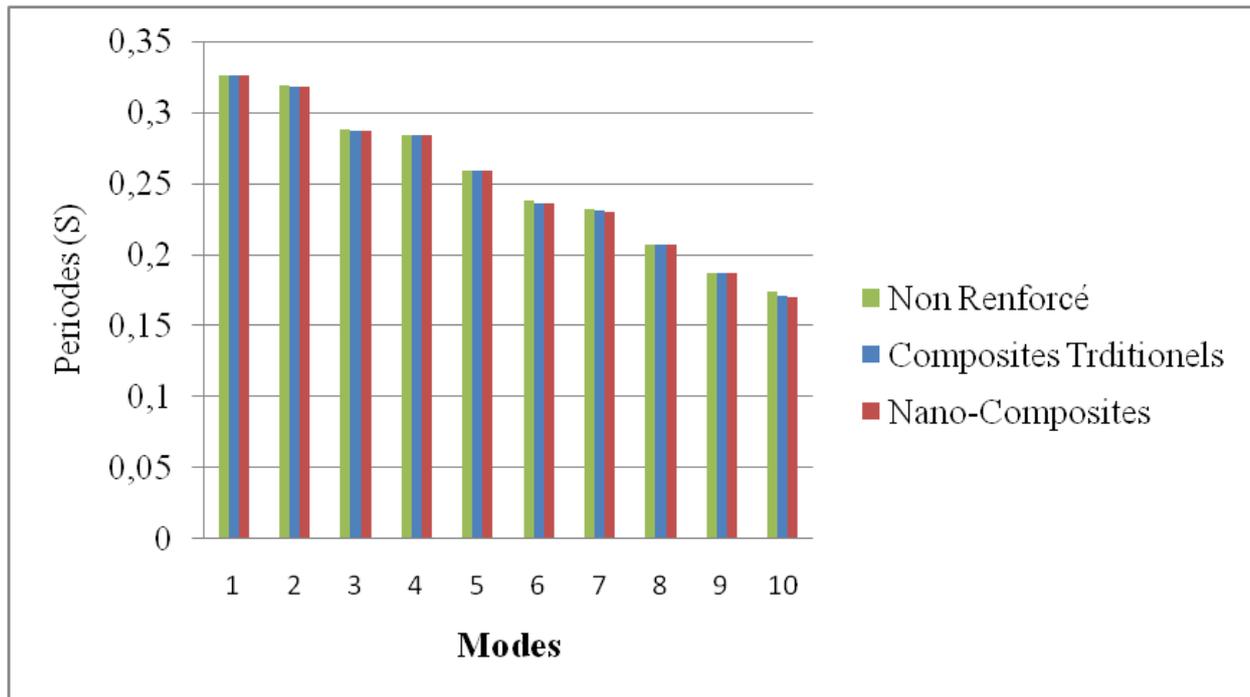
MOD	Pont non renforcé		Pont renforcé par MC traditionnels		Pont renforcé par Nano Composite	
	FREQ (HZ)	Période(s)	FREQ (HZ)	Période(s)	FREQ (HZ)	Période(s)
1	3,0677	0,3259771	3,0703	0,3257011	3,0711	0,3256162
2	3,1361	0,3188674	3,1419	0,3182787	3,143	0,3181674
3	3,4755	0,2877284	3,4822	0,2871748	3,4836	0,2870594
4	3,5174	0,2843009	3,5209	0,2840183	3,522	0,2839296
5	3,8564	0,2593092	3,8625	0,2588997	3,8642	0,2587858
6	4,2002	0,2380839	4,2291	0,2364569	4,2356	0,2360941
7	4,3025	0,232423	4,3318	0,2308509	4,3384	0,2304997
8	4,8204	0,2074517	4,8331	0,2069065	4,8366	0,2067568
9	5,3454	0,1870767	5,3476	0,1869998	5,3487	0,1869613
10	5,759	0,1736413	5,8625	0,1705757	5,8866	0,1698773

On observe que les valeurs des fréquences obtenir par la modélisation de pont renforcé par matériaux composites traditionnels et plus grand que les valeurs des fréquences obtenir par la modélisation de pont non renforcé, donc la période de pont en deuxième cas (modélisation de pont renforcé par matériaux composites traditionnels) est moins que la période de première cas (modélisation de pont sans renforcement), cette différence (augmentation) dans les valeurs des fréquences à été observés dans tous les modes de vibration (Mode 1, Modes 2, Modes 3...jusque à la dernière mode étudié que est le mode 10).



FigureIII.37 : Graphe de comparaison des fréquences de 3 cas étudiés.

On observe aussi que les valeurs des fréquences obtenir par la modélisation de pont renforcé par nano composites et plus grand que les valeurs des fréquences obtenir par la modélisation de pont renforcé par matériaux composites traditionnels, donc la période de pont en troisième cas (modélisation de pont renforcé avec nano composites) est moins que la période de deuxième cas (modélisation de pont renforcé par matériaux composites traditionnels), cette différence (augmentation) dans les valeurs des fréquences à été observés dans tous les modes de vibration (Mode 1, Modes 2, Modes 3...jusque à la dernière mode étudié que est le mode 10).



FigureIII.38 : Graphe de comparaison des périodes de 3 cas étudiés.

Conclusion Générale et Recommandations

Conclusion Générale Recommandations

Les composites à base de fibres de carbone sont des produits utilisés pour le renforcement et/ou la réparation des structures élevées (bâtiments, ponts, tunnels, etc...). Depuis plus de trente ans d'utilisation ces produits, malgré leur efficacité, ont montré quelques insuffisances, surtout au niveau de l'interface (résine époxy), ou le phénomène de décollement pose problème. Cela est dû, à cause de la faible performance mécanique de cette résine. C'est pour cela, qu'on a introduit les nano-composites comme remèdes à ses insuffisances et on l'a appliqué sur une structure réelle de pont en béton armé.

Nous avons contribué, par le biais de ce travail, à la compréhension de cette nouvelle technique "innovante" et montrer son efficacité dans la réduction des périodes de vibration en faisant une analyse modale avec le logiciel Ansys 2020, par application de la MEF. En effectuant une comparaison des résultats de cette modélisation, avant et après renforcement poutres et éléments structuraux, on a constaté ce qui suit :

- Un patrimoine important, d'ouvrages en béton, nécessite une attention particulière et un choix adéquat de moyens de renforcement de ses éléments porteurs (poutres, entretoises, dalles).
- La modélisation numérique par application d'un logiciel professionnel (Ansys 2020), qui est amplement utilisé universellement, a permis de choisir un modèle numérique proche de la réalité et qui a donné une lecture approfondie des résultats.
- Il est possible d'appliquer la technique de renforcement des composites collés, renforcée par insertion des poudres nano-composites (au niveau de la résine) sur le support d'un tablier à poutres en béton (semelle inférieure et l'âme).
- Le renforcement en traction (flexion) et en cisaillement, donne un effet de gain avoisinant les 10%, de la période de vibration.
- L'application de la technique composite, comme solution innovante donne un gain appréciable, à sa portance et à la stabilité de l'ouvrage

Nous recommandons, pour les futurs travaux, de faire un travail expérimental et prendre ces composites, par insertion des nano-composites, NSM (troisième génération), en prenant des cas de grandeur réelle (in situ) ou réduites (au laboratoire), afin de caler le modèle choisi dans la modélisation numérique.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] 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.
- [2] Mohcene. B, Réhabilitation et Renforcement des poutres au moyen des matériaux composites », Thèse de magister, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [3] Ould El Hacem, Z-A, Renforcement Du Béton Par Les Matériaux Composites, Mémoire de fin d'études, Université de Tébessa, 2016.
- [4] GCI 714, Durabilité et réparations du béton, P :160, Université de Sherbrooke
- [5] Cours de pathologie et diagnostique, pour Master2 en génie civil.
- [6] P.R.O.C.E.Q, Le scléromètre le plus sophistiqué pour la mesure de la résistance et de l'uniformité du béton, Original Schmidt Live.
- [7] Essais non destructifs du béton, Chapitre-3, Partie I, P :54, Revue bibliographique.
- [8] Equipement scientifique SA, Département de bio-test, Windsor Probe™ Test System.
- [9] Fissuromètre Mécaniques2, Spécifications Techniques, site web : www.sisgeo.fr, D310.
- [10] Abdessemed. M, Kenai. S, Bali. A, Kibboua. A, Dynamic analysis of a bridge repaired by CFRP, Experimental and numerical modeling, Science Direct, Elsevier, Journal 'Construction & Building Materials', Volume 25, Issue 3, March 2011, Pages 1270-1276.
- [11] Khelifi. K, Renforcement des structures de portiques en béton armé sous l'effet du séisme, Mémoire de fin d'études, Université Larbi Ben Mhidi Oum El Bouaghi. Pôle Ain Beida, 2018.
- [12] Belhannachi. H, Réhabilitation et renforcement des poteaux en béton armé, Thèse de magister, Université Mentouri, Constantine, 2009.
- [13] Senhadji. L, Les nano-composites dans le domaine génie civil applications et objectifs, Mémoire de fin d'études, Université De Blida1, 2015.
- [14] Benzaid. R, Habib.A. Mesbah, Chikh. N, Contribution à l'étude des matériaux composites dans le renforcement et la réparation des éléments structuraux linéaires en béton, 2013.
- [15] ICTAB, Quelques mots sur la tôle d'acier, ICTAB-Données-de-référence-pour-l'acier, 652 Bishop St. N, Unit 2A, Cambridge, Ontario N3H 4V6, 2012.
- [16] Luyckx, J, Composites à fibres de carbone dans le génie civil, Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, AM 5 620, 1999.
- [17] Cours génie civil, Principes généraux de construction-Technologie du bâtiment - Gros œuvre, Les bétons projetés.

- [18] Abou Chakra F, Renforcement des poteaux en béton armé au moyen de polymère renforcé par fibre de carbone - Comparaison des codes, Mémoire d'ingénieur CNAM, Conservatoire National Des Arts Et Métiers ISSAE – Centre Associe Du Liban, 2016.
- [19] BENAÏSSA. I, Béton de sable fibré projeté pour panneau 3d, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2015.
- [20] Patrick. G, Les solutions techniques par la réparation et le renforcement des ouvrages de génie civil en béton, construction moderne/Annuel ouvrage d'art, P :19, 2011.
- [21] Ait Tafati. A, Réparation des poutres en béton armé endommagées à l'aide des matériaux composites hybrides, Mémoire de fin d'études, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2017.
- [22] Laib. A, Réparation et renforcement des structures en béton armé, Thèse de magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2006.
- [23] Benaïssa. M-A, et Menasri. L, Renforcement de la salle de conférence de l'université de Boumerdes avec des matériaux composites T.F.C, Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale des Travaux Publics E.N.T.P,2007.
- [24] Talaiji. T, Développement et caractérisation du comportement thermomécanique de matériaux composites FFC, Thèse de Doctorat, Université De Lyon, 2018.
- [25] Bessière, J.F, La potentialité des matériaux composites de synthèse dans l'architecture, Mémoire de fin d'études, École d'architecture de Paris Belleville, 1996.
- [26] Berreur. L, De Maillard. B, et Nösperger. S, L'industrie française des matériaux composites, Etude stratégique réalisée par nodal consultants pour le compte de la DiGITIP /SIM, Rapport final, Révision 2 du 13 mai 2002.
- [27] Teng, J.G, Chen. J.F, Smith. S.T, et Lam. L, FRP strengthened RC structures”, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 245p, 2002.
- [28] Drapier. S, Mécanique des composites hautes performances, Version 2, Département Mécanique et Procédés d'Elaboration Centre Science des Matériaux et des Structures & LCG UMR CNRS 5146 École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne158, Cours Fauriel42023 Saint- Étienne Cedex 2 bureau J3-15, P : 3/8/17, 2015.
- [29] Laurent. G, Généralité sur les matériaux composites. Ecole d'ingénieur. 28/09/2008. <cel-00470296v1> Submitted on 6 Apr 2010 (v1), last revised 19 Jan 2011 (v2).
- [30] Houideg. A, Transfert de charge et frottement fibre/matrice d'un matériau composite (T300/914), Université des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, mémoire de magister P : 26, 2012.
- [31] Chatain. M, Matériaux composites : présentation générale, AM 5000, Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, Vol. AM 6, 2001.
- [32] Foo. S, Naumoski. N, et Saatcioglu. M, Aléas sismiques, codes du bâtiment et opinions d'atténuation des risques pour les immeubles canadiens, Bureau de la protection des

infrastructures essentielles et de la protection civil, Ministère des Travaux Publics et Service Gouvernementaux, N° du Catalogue : D 82-73/F-IN, 2002.

[33] Mebarki S, Etude du l'effet de matrice sur le comportement des stratifiées carbone-époxy , Mémoire de fin d'études, Université A. M. Oulhadj –Bouira, 2016.

[34] Jeremie. A, Etude comparative du comportement de composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable, Thèse Doctorat, Universités à l'INSA de Rouen, Le 8 décembre 2009.

[35] Carolin, A, Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements", Doctorate Thesis, Lulea University of Technology, P :178, 2003.

[36] Guillon. D, Fibres de verre de renforcement, Technique de l'ingénieur, Traité Plastique et Composites, A2 110, 1995.

[37] Meier. U, et Winistorfer. A, Retrofitting of structures through external bonding of CFRP sheets, Non-Metallic FRP Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of The Second International RILEM Symposium, Ghent, Belgium, edited by Taerwe, L, P :509-516, London, UK, 1995.

[38] Bardonnnet. P, Résines époxy, Technique de l'ingénieur, Traité Plastiques et Composites, A 3 465, A 3 466, 1992.

[39] Cours de MDC II, Chapitre V, Les polymères composites, Universite Setif-1 Faculte De Technologie, Departement De Genie Civil, 2020.

[40] Ajayan. P, Ajayan. M, Stephan. O, Colliex. C, Trauth. D, Aligned carbon nanotube arrays formed by cutting a polymer resin-nanotube composite. Science, 265 (5176), 1212 - 1214, 1994.

[41] Bartholome. C, Miaud. P et, Derré. A, Maugey. M, Roubeau. O, Zakri. C, Poulin. P, Influence of surface functionalization on the thermal and electrical properties of nanotube-PVA composites, Composites Science and Technology, 68 (12), 2568-2573, 2008.

[42] Gorge. R. E, Lau. K.K.S, Gleason. K. K, Cohen. R. E, The importance of interfacial design at the carbon nanotube/polymer composite interface. Journal of Applied Polymer Science, 102 (2), 1413-1418. 2006.

[43] Dihaj. A, Modélisation numérique du comportement mécanique d'un nano-composite a matrice polymère et nano-renfort, Thèse De Doctorat En Sciences, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, 2019.

[44] Bensattalah .T, Comportement vibratoire d'un nanotube de carbone sous l'effet thermique en milieu élastique, Thèse De Doctorat En Sciences, Université Djillali Liabes Sidi Bel Abbes, 2016.

[45] T.X. Liu, I.Y. Phang, L. Shen, S.Y. Chow, W.D. Zhang, "Morphology and Mechanical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6 Composites" Macromolecules, 2004, 37,7214-7222, 2004.

[46] Kim. J.Y, Park. H.S, Kim. S.H, Journal of Applied Polymer Science, P103, 14501457, 2007.

- [47] Cai. D. Y, Song. M, Latex technology as a simple route to improve the thermal conductivity of a carbon nanotube/polymer composite, *Carbon* 2008, 46 (15), 2107-2112, 2008.
- [48] Wang. S. R, Liang. R, Wang. B, Zhang. C, *Carbon* 2009, 47 (1), P53-57, 2009.
- [49] Kashiwagi (2002) T. Kashiwagi, E. Grulke, J. Hilding, R. Harris, W. Awad, J. Douglas, *Macromolecular rapid communication*, 23, 761-765, 2002.
- [50] Schartel. B, Pötschke. P, Knoll. U, Abdel. M, *Goad European Polymer Journal*, 41, 1061-1070, 2005.
- [51] Ajayan. P.M, Tour. J. M, *Materials science - Nanotube composites. Nature* ,447 (7148), 1066-1068, 2007.
- [52] Wei. C.Y, *Applied Physics Letters*, 88 (9), 2006.
- [53] Ajayan. P. M, Schadler. L. S, Giannaris. C, Rubio. A, *Single-walled carbon nanotube-polymer composites: Strength and weakness. Adv. Mater*, 12 (10), 750-753, 2000.
- [54] Aitattmane. H, *Vibration des structures composites en tenant compte de l'effet du cisaillement, Université Djillali Liabes de Sidi bel Abbes*, 2011.
- [55] Gao. J, Itkis. M. E, Yu. A, Bekyarova. E, Zhao. B, Haddon. R.C, *Continuous Spinning of a Single-Walled Carbon Nanotube à Nylon Composite Fiber, Journal of the American Chemical Society*, 127 (11), 3847-3854, 2005.
- [56] Zidour. M, *Etude du comportement mécanique des nanotubes en carbone entourés par une matrice polymère, thèse de doctorat, Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes*, 2012.
- [57] Kaci. A. *Etude Et Analyse Non Lineaire Des Plaques Minces Non Homogène En Flexion Cylindrique, thèse de doctorat, Université Djilali Liabes De Sidi Bel Abbes*, 2012.
- [58] Bouchaar. M, *Modélisation Numérique Du Comportement Mécanique D'un Nano-Composite A Matrice Polymere Et Nano-Renfort, Mémoire présenté en vue de l'obtention du Diplôme De Maîtrise Ès Sciences Appliquées, École Polytechnique De Montréal*, 2011.
- [59] Marquis. D, Guillaume. E, C. Chivas-Joly, *Properties of nano-fillers in Polymer, In: J. Cuppoletti, Nanocomposites and polymers with analytical methods, Rijeka, Croatia, InTech*, 261-284, 2011.
- [60] Fina. A, H.C.L. Abbenhuis, *Polymer Degradation and Stability*, 91, p.1064-1070, 2006.
- [61] Peeterbroeck. S, Alexander. M, *Composites Science and Technology*, 64, p.2317-2323 2004.
- [62] Baziz. M, *Synthèses Et Caractérisations De Nano composites Polyaniline - Sépiolite, Mémoire de Magister, L'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohammed Boudiaf*, 2010.
- [63] Abdelli. F, *Elaboration et caractérisation de nanocomposites Cellulose/Montmorillonite, Mémoire De Magister, Université M'hamed Bougara*, 2008.

- [64] Hassar. M, Influence des nanocharges de noir de carbone sur le comportement mécanique de matériaux composites : application au blindage électromagnétique, Thèse Docteur, l'UTC Université de Technologie de Compiègne, 2013.
- [65] Environnement Canada, Ébauche d'évaluation préalable pour le défi concernant le noir de carbone, Numéro de registre du Chemical Abstracts Service, 1333-86-4, 2011.
- [66] Brigatti. M.F, Galan. E et Theng. B. K. G, Structures and mineralogy of clay minerals, Developments in clay science, vol. 1, p. 19-86, 2006.
- [67] Gul. S, A. Kausar, M. Bakhtiar, et S. Jabeen, Research Progress on Properties and Applications of Polymer/Clay Nanocomposite, Polymer- Plastics Technology and Engineering, vol. 55, no 7, p. 684-703, 2016.
- [68] Bergaya. F, et Lagaly. G, General introduction: clays, clay minerals, and clay science, Handbook of clay science, vol. 1, p. 1-18, 2006.
- [69] Garaj. S, H. William et J. Golovchenko, Graphene synthesis by ion implantation, Applied physics letters, vol. 97, no 18, p. 183103, 2010.
- [70] Boussaboun. Z, Synthèse et caractérisation de nano composites d'argile et de graphène formés à partir de précurseurs organiques, Mémoire Présenté A L'école De Technologie Supérieure, Université Du Québec 2016.
- [71] Favier.V, Etude de nouveaux matériaux composites obtenus à partir de latex filmogènes et de whiskers de cellulose : Effets de percolation mécanique, Thèse de doctorat, Grenoble : INP de Grenoble, 294 p (1995).
- [72] Fresne. A, Vignan. M.R, Improvement of starch film performances using cellulose micro fibrils, Macromolecules, 31(8): 2693-2696, 1998.
- [73] Global Software SARL, Logiciel de calcul de structure, Analyse aux éléments finis MEF, 93464 Tieffenbach Allemagne, 2020.
- [74] Academic Ansys, Free Student Software Downloads, Home site web official, 2020.
- [75] Ansys. Inc Southpoint, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications, 275 Technology Drive P671, 2009.
- [76] Ansys. Inc Southpoint, Theory Reference for the Mechanical APDL and Mechanical Applications" chapitre:14, 275Thechnology Drive, P833, 2009.
- [77] Avis Technique 3/16-875, Sika CarboDur SikaWrap, Annule et remplace l'Avis Technique 3/10-669, arrêté du 21 mars 2012.
- [78] Sika Building Trust" Sikadur-300", Notice Produit, Mai 2018, Version 02.01.
- [79] ENSICAEN, TP de Simulation Numérique par Eléments Finis Code de calcul ANSYS Mechanical Etudes non linéaires, 3A EMS Option Matériaux Structuraux, Année 2018-2019.