

**UNIVERSITÉ DE BLIDA1**

**Faculté de Technologie**

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo-matériaux et Génie Civil

**THÈSE DE DOCTORAT**

Spécialité Génie Civil

**APPLICATION DES COMPOSITES INNOVANTS  
(NOUVELLE GENERATION) DANS LA RÉPARATION/ RENFORCEMENT  
DES ÉLÉMENTS STRUCTURAUX  
ANALYSE EXPÉRIMENTALE ET MODELISATION NUMÉRIQUE**

Par :

**OUADAH Nouredine**

Devant le jury composé de :

<b>KENAI Said</b>	<b>Prof. Université de Blida1</b>	<b>Président</b>
<b>CHAID Rabah</b>	<b>Prof. Université de Boumerdes</b>	<b>Examineur</b>
<b>KIBBOUA Abderrahmane</b>	<b>Directeur de Recherche C.G.S/ Alger</b>	<b>Examineur</b>
<b>DEBIEB Farid</b>	<b>Prof. Université de Médéa</b>	<b>Examineur</b>
<b>MENADI Belkacem</b>	<b>Prof. Université de Blida1</b>	<b>Examineur</b>
<b>ABDESSEMED Mouloud</b>	<b>M.C.A Université de Blida1</b>	<b>Rapporteur</b>

**U.S.D. Blida1 - 2023**

**UNIVERSITÉ DE BLIDA1**

**Faculté de Technologie**

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géo-matériaux et Génie Civil

**THÈSE DE DOCTORAT**

Spécialité Génie Civil

**APPLICATION DES COMPOSITES INNOVANTS  
(NOUVELLE GENERATION) DANS LA RÉPARATION/ RENFORCEMENT  
DES ÉLÉMENTS STRUCTURAUX  
ANALYSE EXPÉRIMENTALE ET MODELISATION NUMÉRIQUE**

Par :

**OUADAH Nouredine**

Devant le jury composé de :

<b>KENAI Said</b>	<b>Prof. Université de Blida1</b>	<b>Président</b>
<b>CHAID Rabah</b>	<b>Prof. Université de Boumerdes</b>	<b>Examineur</b>
<b>KIBBOUA Abderrahmane</b>	<b>Directeur de Recherche C.G.S/ Alger</b>	<b>Examineur</b>
<b>DEBIEB Farid</b>	<b>Prof. Université de Médéa</b>	<b>Examineur</b>
<b>MENADI Belkacem</b>	<b>Prof. Université de Blida1</b>	<b>Examineur</b>
<b>ABDESSEMED Mouloud</b>	<b>M.C.A Université de Blida1</b>	<b>Rapporteur</b>

**U.S.D. Blida1 - 2023**

## Dédicaces

À mes *P*arents, *Q*ui m'ont *E*ncouragé pour *C*ontinuer mes *É*tudes...

À la *M*émoire de mes *G*rands-*P*arents *M*aternels, *Q*ui ont *T*oujours *C*ru en moi, *Q*u'*A*llah leur *A*ccorde sa *S*ainte *M*iséricorde. *A*insi qu'à mes *G*rands-*P*arents *P*aternels, *Q*ui m'ont *T*oujours *S*outenu durant les *T*emps *D*ifficiles ...

À ma *P*etite *F*rangine '*S*irine', *Q*ui m'a *D*onnée le *C*ourage par *S*on *S*ourire, ainsi que mes *F*rères '*A*laa*E*ddine' et '*I*mad' ...

*A*u *C*her '*A*hmed', *Q*ui a *T*oujours été à mes *C*ôtés, pour son *S*outien *M*oral dans mes *P*ires *M*oments, ses *C*onseils et *E*ncouragements *Q*ui m'ont *T*oujours *A*pporté un *P*lus ...

*Noureddine*

## Remerciements

Je Remercie en premier lieu ‘*Allah*’, *qu’Il soit Glorifié et Exalté*, pour m’avoir donné la force et l’audace pour surpasser toutes les difficultés, la volonté et le courage pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement mon Directeur de thèse, *Dr Mouloud ABDESSEMED*, Enseignant- Chercheur au Département de Génie Civil (Laboratoire de Recherche/LGMGC) à l’Université Saad Dahlab de Blida1, pour avoir cru en moi, m’avoir accordé la chance de travailler sous sa direction, pour son soutien, ses orientations et ses multiples conseils qui m’ont permis de mener à terme et dans des bonnes conditions mes travaux de recherches de Doctorat.

Mes sincères remerciements à tous les membres de jury, d’avoir accepté à lire, à examiner et à donner les remarques et les corrections au manuscrit de ma thèse. Que le *Professeur KENAI S.*, Président de jury, *les Professeurs : CHAID R., DEBIEB F., MENADI B.* et *Docteur KIBBOUA A.*, Examineurs, trouvent ici tous mes respects pour leur temps très précieux accordé, par leurs présences, à la soutenance de ma thèse.

Mes vifs remerciements à *Mme H. KESTALI*, ainsi que tous les personnels du laboratoire *LCTP (Laboratoire Central de Travaux Publics) /Antenne de Blida*, de m’avoir accueilli au sein de leur laboratoire, d’avoir mis sous ma disposition tout le matériel nécessaire et surtout de l’aide et leurs précieuses conseils durant toute ma compagne expérimentale.

Je tiens à remercier Monsieur le Directeur Général Adjoint *Mr Nacim HEDIMI*, ainsi que tous les responsables de la société *SIKA AL DJAZAIR*, pour leur accueil chaleureux et leur contribution à l’accomplissement de ce modeste travail.

Je Présente mes sincères remerciements à Mme le Chef de Département et à tout le corps enseignant du Département de Génie Civil, ainsi qu’au personnel administratif et technique de l’Université Saad Dahlab de Blida1 et tous ceux qui m’ont accompagné et soutenu de près ou de loin dans l’accomplissement de cette thèse.

J’exprime ma gratitude également à tous les amis et collègues et membres de laboratoires de recherche (LGMGC), pour leur soutien matériel et moral pour l’aboutissement de mes travaux expérimentaux.

*A Vous Tous,*

*Je vous dis.....Merci.*

## ملخص

يعد استخدام المواد المركبة لإصلاح وتعزيز الهياكل الخرسانية ممارسة واسعة الانتشار في العالم، ولكنها لا تزال تمثل مشكلة انفصال الألواح أو الألياف بسبب ضعف أداء المصفوفة أو الغراء خاصة في المناطق القاحلة والساخنة .

من أجل إيجاد حل مبتكر لهذه المشكلة، التي تؤثر على ما يقرب من 8% من الهياكل المعززة بمركبات البوليمر المعزز بالألياف PRF في الجزائر، تتم دراسة استخدام مركبات نانوية جديدة لتحسين مصفوفة البوليمر من خلال دراسات مخبرية تجريبية على عناصر الخرسانة المسلحة المعززة بواسطة البوليمر المعزز بألياف الكربون CFRP.

تجارب انعطاف أربع نقاط على روافد من الخرسانة المسلحة ذات حجم مصغر تحت تحميل مستمر حتى حد الكسر دون أي تعزيز، مع التعزيز دون ضرر سابق بواسطة CFRP التقليدي وتحسينها بإضافة نسب مئوية تتراوح بين 0.1 و 0.5% من أنابيب الكربون النانوية CNTs إلى الراتنج ، والتعزيز بعد التلف الأولي وإصلاح الشقوق بإستعمال نفس الأنظمة السابقة.

يتم إجراء نمذجة رقمية بطريقة العناصر المحدودة من خلال برنامج النمذجة Ansys 2021 من أجل التحقق من صحة النتائج التي تم الحصول عليها من خلال الحملة التجريبية.

أظهرت نتائج الاختبارات المختلفة التي أجريت وكذلك النمذجة عبر MEF فعالية إضافة CNTs كتعزيز نانوي إلى مصفوفة الإيبوكسي لتحسين الخواص الميكانيكية للأخيرة.

### الكلمات المفتاحية :

الهياكل، المواد، التدهور، التعزيز / الإصلاح، المواد المركبة، CNTs، الحملة التجريبية ، النمذجة الرقمية.

# Résumé

L'utilisation des matériaux composites pour la réparation et le renforcement des structures en béton est une pratique bien répandue dans le monde, mais qui représente toujours le problème de délamination des plaques ou fibres due aux mauvaises performances de la matrice ou colle surtout en zones arides et chaudes.

Dans le but de trouver une solution innovante à ce problème qui touche près de 8% des structures renforcés par PRF en Algérie, l'emploi des nouveaux Nano-composites pour amélioration de la matrice polymère est étudié via des études expérimentales en laboratoire sur des éléments en BA renforcés par CFRP.

Des essais de flexion 04 points sur des poutres en BA à échelle réduite sous chargement continue jusqu'à la limite de rupture sans aucun renforcement, avec renforcement sans endommagement antérieur par CFRP classique et amélioré en ajoutant des pourcentages entre 0.1 et 0.5% de NanoTubes de Carbone CNTs à la résine, et un renforcement après un endommagement préliminaire et réparation des fissures par les mêmes systèmes précédents.

Une modélisation numérique par la méthode des éléments finis par le biais du logiciel de modélisation Ansys 2021 est réalisée afin de valider les résultats obtenus par la campagne expérimentale.

Les résultats des différents essais réalisés ainsi que la validation par MEF ont montré l'efficacité de l'ajout des CNTs comme nano-renfort à la matrice époxydique pour l'amélioration des propriétés mécaniques de cette dernière.

## Mots Clés :

Structure, matériaux, dégradation, renforcement / réparation, composites, CNTs, expérimental, numérique.

# **Abstract**

The use of composite materials for the repair and reinforcement of concrete structures is a widespread practice in the world, but still represents the problem of delamination of plates or fibers due to poor performance of the matrix or glue especially in arid and hot areas.

In order to find an innovative solution to this problem that affects nearly 8% of the structures reinforced by FRP in Algeria, the use of new Nano-composites for improvement of the polymer matrix is studied via experimental studies in laboratory on elements in BA reinforced by CFRP.

Four-point bending tests on scaled-down RC beams under continuous loading up to the failure limit without any reinforcement, with reinforcement without previous damage by classical and improved CFRP by adding percentages between 0.1 and 0.5% of Carbon NanoTubes (CNTs) to the resin, and reinforcement after preliminary damage and crack repair by the same previous systems.

A numerical modelling by the finite element method using Ansys 2021 modelling software is carried out in order to validate the results obtained by the experimental campaign.

The results of the various tests carried out as well as the validation by FEM showed the effectiveness of the addition of CNTs as nano-reinforcement to the epoxy matrix for the improvement of the mechanical properties of the latter.

## **Keywords:**

Structure, materials, degradation, strengthening/repair, composites, CNTs, experimental, numerical.

# SOMMAIRE

DEDICACES

REMERCIEMENTS

RESUMES (Arabe, Français, Anglais)

TABLE DES MATIERES

Liste des illustrations graphiques et tableaux

Liste des symboles et des abréviations

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>4</b>
I.1 INTRODUCTION .....	4
I.2 PATRIMOINE DES STRUCTURES EN ALGERIE.....	5
I.2.1 Secteur de l'Habitat.....	5
I.2.2 Secteur des Travaux Publics.....	5
I.2.3 Répartition des Ponts en Algérie .....	5
I.3 REPARATION DES STRUCTURES EN BETON ARMEE.....	7
I.3.1 Pathologies des Constructions.....	7
I.3.2 Type D'endommagements Des Structures.....	7
I.3.3 Causes D'endommagements Des Structures En Béton .....	9
I.3.4 Méthodes De Réparation Et De Renforcement Des Structures En Béton.....	13
I.3.5 Les Matériaux Composites Comme Matériau De Réparation Innovant.....	17
I.4 COMPOSITES A BASE DE POLYMERES .....	18
I.4.1 Généralités .....	18
I.4.2 Types De Composites.....	20
I.4.3 Générations Des Composites.....	25
I.5 HISTORIQUE ET GENESE D'APPLICATION.....	33
I.5.1 La Réparation et/ou Renforcement Des Structures En Béton Par Composites .....	28
I.5.2 L'amélioration de la résine (matrice) par ajout des nano charges .....	31
I.5.3 L'utilisation des résines époxy modifiés par nanomatériaux pour le renforcement .....	41
I.6 CONCLUSION.....	44

<b>II. MATERIAUX, ESSAIS ET PROCEDURES EXPERIMENTALES .....</b>	<b>45</b>
II.1 INTRODUCTION.....	45
II.2 PROGRAMME EXPERIMENTAL DES POUTRES.....	45
II.2.1 <i>Caractérisation des Matériaux</i> .....	46
II.2.2 <i>Instrumentation et Appareil de Mesure</i> .....	61
II.2.3 <i>Préparation des Spécimens d'Essai</i> .....	64
II.2.4 <i>Essai sur Poutres BA Renforcées par CFRP Sans Endommagement</i> .....	69
II.2.5 <i>Essai sur Poutres BA Réparées par CFRP Après Endommagement</i> .....	70
<b>III. ANALYSE NUMERIQUE ET CHOIX DU LOGICIEL.....</b>	<b>72</b>
III.1 INTRODUCTION.....	72
III.2 LOGICIEL DE MODELISATION .....	72
III.3 METHODE D'ANALYSE NON LINEAIRE .....	75
III.4 MODELISATION DES ELEMENTS EN BETON ARME RENFORCES .....	76
III.4.1 <i>Modélisation des éprouvettes d'essai renforcées par CFRP et CNTs</i> .....	77
III.4.2 <i>Modélisation des poutres renforcées par CFRP et CNTs</i> .....	86
III.4.3 <i>Modélisation des poutres de tablier de pont renforcées par CFRP et CNTs</i> .....	90
<b>IV. RESULTATS ET DISSCUSSIONS.....</b>	<b>98</b>
IV.1 INTRODUCTION.....	98
IV.2 RESULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE.....	98
IV.2.1 <i>Essai d'adhérence « Pull Off Test »</i> .....	98
IV.2.2 <i>Essai de Flexion sur les poutres en BA</i> .....	99
IV.3 ANALYSE MODALE DU PONT RENFORCE.....	105
IV.3.1 <i>Principe</i> .....	105
IV.3.2 <i>Modélisation du Pont Sans Renforcement</i> .....	106
IV.3.3 <i>Modélisation du Pont par Matériaux Composites Traditionnels</i> .....	109
IV.3.4 <i>Modélisation du Pont avec insertion des nano composites</i> .....	109
IV.3.5 <i>Discussion et Commentaires</i> .....	110

<b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>111</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>113</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>121</b>
<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>126</b>

# **LISTE DES FIGURES**

## ***CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE***

FIGURE I-1 : Réhabilitation d'un pont à Oued Djeddi (Biskra).....	4
FIGURE I-2 : Construction de logements AADL (Alger).....	5
FIGURE I-3 : Répartition des ponts selon le type du tablier .....	6
FIGURE I-4 : Répartition des ponts par zone sismique en Algérie. ....	6
FIGURE I-5 : Répartition des ponts selon leur état physique .....	7
FIGURE I-6 : Vue de l'effondrement du pont "Silver Bridge".....	8
FIGURE I-7 : Vue de fissuration du béton.....	9
FIGURE I-8 : Faïençage du béton.....	9
FIGURE I-9 : Eclatement du béton due à un choc .....	11
FIGURE I-10 : Vue de fissures dues au retrait au béton .....	12
FIGURE I-11 : Etapes d'occurrence de la corrosion.....	12
FIGURE I-12 : Corrosion avancée de l'armature HA .....	11
FIGURE I-13 : Ragréage après traitement de corrosion des armatures .....	13
FIGURE I-14 : Mécanisme d'injection des fissures .....	14
FIGURE I-15 : Application d'hydrofuges de surface .....	15
FIGURE I-16 : Pose de mortier pour assurer l'enrobage .....	15
FIGURE I-17 : Technique de protection cathodique.....	15
FIGURE I-18 : Technique d'extraction des chlorures.....	16
FIGURE I-19 : Application d'une précontrainte additionnelle extérieure.....	17
FIGURE I-20 : Vue microscopique du matériau composite .....	18
FIGURE I-21 : Microbilles creuses en verre.....	19
FIGURE I-22 : Renforts en verre (fibres courtes et fibres longues) .....	19
FIGURE I-23 : Différentes fibres (Carbone (a), Aramide (b), Bore (c) et Verre (d)).....	20
FIGURE I-24 : Processus de production des fibres de carbone à base de PAN .....	22
FIGURE I-25 : Renforcement par Collage Externe des FRP .....	25
FIGURE I-26 : Utilisation de la technique 'Montage en Surface 'des FRP.....	26
FIGURE I-27 : Nanotube de Carbone à Parois Simple .....	27
FIGURE I-28 : Nanotube de carbone à parois multiples MWCNT.....	27
FIGURE I-29 : Caractéristiques géométriques des poutres pré contraintes.....	28
FIGURE I-30 : Déflexion à mi-portée des poutres testées .....	29

FIGURE I-31 : Courbes charge-déformation .....	29
FIGURE I-32 : Configuration de la poutre BA continue/ Position des jauges de contrainte .....	30
FIGURE I-33 : Détails des poutres renforcées en mm .....	30
FIGURE I-34 : Variation de la charge en fonction du déplacement pour poutres .....	31
FIGURE I-35 : Effet de l'ajout de SWCNT sur la résistance de la résine.....	32
FIGURE I-36 : Courbes contrainte - déformation de l'époxy pur et des composites SWCNT/époxy .....	32
FIGURE I-37 : Images MEB en vue de dessus (a, b) et en vue de côté (c, d) des surfaces de rupture en traction de feuilles composites SWCNT/époxy avec une charge de CNT de 20,5 wt% (a, c) et 39,1 wt% (b, d) .....	33
FIGURE I-38 : Schéma et dimensions de l'éprouvette de traction en mm .....	33
FIGURE I-39 : Résistance de traction et le module de Young des résines époxy pures et nano composites .....	34
FIGURE I-40 : Forme (a) et dimensions (b) de l'échantillon (test de résistance au pelage) .....	34
FIGURE I-41 : Spécimen de joint monté sur l'inducteur électrodynamique .....	35
FIGURE I-42 : Comparaison en fonction des variantes envisagées (a) la résistance à la fatigue; (b) la durabilité à la fatigue .....	35
FIGURE I-43 : Comparaison/résistance au cisaillement des CNT/fractions de poids.....	36
FIGURE I-44 : Variation des joints de recouvrement adhésifs/composites C/C et C/C-SiC.....	36
FIGURE I-45 : Schéma d'un spécimen de poutre en béton renforcé par des CFRP .....	37
FIGURE I-46 : Courbe typique contrainte de traction en fonction de déformation des échantillons (a) condition de contrôle ; b) protocole de conditionnement accéléré .....	37
FIGURE I-47 : Charge en fonction du déplacement pour un essai typique.....	37
FIGURE I-48 : Profils de contrainte-déformation des différents thermodurcissables .....	38
FIGURE I-49 : Propriétés mécaniques de l'époxy et des nanocomposites à différents % en poids de GNC.....	39
FIGURE I-50 : contrainte - déformation des joints collés dans les essais de traction ASTM D 2095 .....	40
FIGURE I-51 : Résistance au cisaillement sur un seul recouvrement des différentes fractions de poids des joints collés GNP/époxy .....	40
FIGURE I-52 : Contrainte de flexion en fonction de la déformation d'échantillons nano composites témoins et renforcés par des nano particules .....	41
FIGURE I-53 : Les différents modes de rupture des échantillons testées.....	42
FIGURE I-54 : Dimensions et détails des armatures des spécimens d'essai.....	42
FIGURE I-55 : Réponse charge - déflexion des spécimens témoins, époxy pure et époxy renforcée .....	43
FIGURE I-56 : Modèle typique par MEF d'une poutre en béton Armé renforcé.....	43



### **CHAPITRE III : ANALYSE NUMERIQUE ET CHOIX DU LOGICIEL**

FIGURE III -1 : Interface Graphique Utilisateur GUI d'Ansys APDL.....	73
FIGURE III -2 : Interface Graphique Utilisateur GUI d'Ansys Workbench.....	74
FIGURE III -3 : Convergence par itérations de Newton-Raphson .....	75
FIGURE III -4 : Comportement du béton .....	75
FIGURE III -5 : Comportement de l'acier HA.....	75
FIGURE III -6 : Lois de comportement des aciers de construction.....	76
FIGURE III -7 : Dimensions et schéma statique de l'éprouvette .....	77
FIGURE III -8 : Section Droite.....	77
FIGURE III -9 : Disposition du ferrailage de la poutre d'essai .....	77
FIGURE III -10 : Élément 3D SOLID 65 .....	78
FIGURE III -11 : Diagramme contrainte-déformation simplifié du béton en compression.....	79
FIGURE III -12 : Propriétés mécanique du béton (Solid65) .....	79
FIGURE III -13 : Caractéristiques isotropiques du béton (Solid 65).....	80
FIGURE III -14 : Insertion des valeurs des contraintes et déformation du béton utilisé (Comportement non linéaire).....	80
FIGURE III -15 : Élément 3D LINK180 .....	81
FIGURE III -16 : Diagramme contrainte – déformation de l'acier .....	81
FIGURE III -17 : Propriétés mécaniques de l'acier isotropique.....	81
FIGURE III -18 : Insertion des différents paramètres De l'acier dans ANSYS.....	82
FIGURE III -19 : Élément 3D Solid 185 avec ces deux modes : (a) structural ; (b) layered .....	82
FIGURE III -20 : Insertion des caractéristiques des lamelles Sika Carbodur dans logiciel .....	83
FIGURE III -21 : Insertion des caractéristiques de la résine époxy .....	84
FIGURE III -22 : Modèle EF représentant le renforcement des poutres BA.....	85
FIGURE III -23 : Maillage de la poutre après discrétisation.....	85
FIGURE III -24 : Application des charges et conditions aux limites .....	86
FIGURE III -25 : Dimensions et schéma statique de la poutre d'essai.....	87
FIGURE III -26 : Schéma de ferrailage adopté.....	87
FIGURE III -27 : Vue de maillage de la poutre modélisée .....	88
FIGURE III -28 : Mode de renforcement par lamelles (RA1).....	88
FIGURE III -29 : Mode de renforcement en "U" (RA2).....	88
FIGURE III -30 : Connectivité d'éléments (a) connectivité béton/acier (b) connectivité béton/couche de FRP .....	89
FIGURE III -31 : Vue du tablier du pont .....	90

FIGURE III -32 : Vue du tablier avec culée.....	90
FIGURE III -33 : Géométrie du tablier du pont dans le sens transversal .....	91
FIGURE III -34 : Vue du pont dans le sens longitudinal .....	92
FIGURE III -35 : Modèle sens longitudinal.....	92
FIGURE III -36 : Modèle sens transversal.....	92
FIGURE III -37 : Modèle vu de haut .....	93
FIGURE III -38 : Modèle vue de bas .....	93
FIGURE III -39 : Vue en perspective du pont.....	93
FIGURE III -40 : Maillage du pont.....	94
FIGURE III -41 : Discrétisation et création des nœuds.....	94
FIGURE III -42 : Conditions aux limites du modèle EF.....	95
FIGURE III -43 : Placement de la résine sous poutres de pont .....	96
FIGURE III -44 : Placement des plaques Sika carbodur sous poutres de pont.....	96
FIGURE III -45 : Emplacement de la résine Sikadur 300 colle .....	97
FIGURE III -46 : Emplacement des tissus Sikawrap monodirectionnel.....	97

#### **CHAPITRE IV : *RESULTATS ET DISCUSSIONS***

FIGURE IV -1 : Résultats de l'essai Pull-Off : Force et contrainte d'adhérence .....	99
FIGURE IV -2 : Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre de référence "PC" .....	100
FIGURE IV -3 : Evolution des fissures pour les poutres de contrôle "PC" .....	100
FIGURE IV -4 : Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-0" en comparaison avec celle de la poutre de référence "PC" .....	101
FIGURE IV -5 : Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-0.5" en comparaison avec celle de la poutre "PR1-0" .....	102
FIGURE IV -6 : Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-1" en comparaison avec celle de la poutre "PR1-0" .....	102
FIGURE IV -7 : Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-1.5" en comparaison avec celle de la poutre "PR1-0" .....	103
FIGURE IV -8 : Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-2" en comparaison avec celle de la poutre "PR1-0" .....	103
FIGURE IV -9 : Courbe Charge - Déformation récapitulative des différentes séries de poutres renforcées testées .....	104
FIGURE IV -10 : Courbe Charge - Déformation récapitulative des différentes séries de poutres réparées testées .....	105
FIGURE IV -11 : : Distribution des contraintes dans la poutre de référence : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.....	106

FIGURE IV -12 : Déplacement total de la poutre de référence.....	107
FIGURE IV -13 : Distribution des déformations dans la poutre de référence .....	107
FIGURE IV -14 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composites classiques :	
(a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.....	108
FIGURE IV -15 : Déplacement total de la poutre renforcée par composites classiques.....	109
FIGURE IV -16 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composites classiques .....	109
FIGURE IV -17 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 0.5% CNT's : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.....	110
FIGURE IV -18 : Déplacement total de la poutre renforcée par composite amélioré avec 0.5% CNT's .....	111
FIGURE IV -19 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 0.5% CNT's .....	111
FIGURE IV -20 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 1% CNT's : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous .....	112
FIGURE IV -21 : Déplacement total de la poutre renforcée par composite amélioré avec 1% CNT's .....	113
FIGURE IV -22 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 1% CNT's.....	113
FIGURE IV -23 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 1.5% CNT's : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.....	114
FIGURE IV -24 : Déplacements totales de la poutre renforcée par composite amélioré avec 1.5% CNT's .....	115
FIGURE IV -25 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 1.5% CNT's.....	115
FIGURE IV -26 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 2% CNT's : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous .....	116
FIGURE IV -27 : Déplacement total de la poutre renforcée par composite amélioré avec 2% CNT's .....	117
FIGURE IV -28 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 2% CNT's.....	117
FIGURE IV -29 : Mode 1. Translation longitudinal (N).....	120
FIGURE IV -30 : Mode 2. Premier fléchissement vertical (Y) .....	120
FIGURE IV -31 : Mode 3. Torsion simple.....	121
FIGURE IV -32 : Mode 4. 2 <sup>ème</sup> Torsion simple.....	121
FIGURE IV -33 : Mode 5. Double torsion du tablier .....	122
FIGURE IV -34 : Mode 6. Translation latérale du tablier .....	122
FIGURE IV -35 : Mode 7. Translation latérale du tablier .....	123

FIGURE IV -36 : Mode 8. Fléchissement fort .....	123
FIGURE IV -37 : Mode 9. Translation latérale (E).....	124
FIGURE IV -38 : Mode 10. Translation latérale (E).....	124
FIGURE IV -39 : Mode 1. Translation longitudinal (N).....	126
FIGURE IV -40 : Mode 2. Premier fléchissement vertical (Y).....	126
FIGURE IV -41 : Mode 3. Torsion simple.....	127
FIGURE IV -42 : Mode 4. Deuxième fléchissement vertical (Y) .....	127
FIGURE IV -43 : Mode 5. Double torsion du tablier.....	128
FIGURE IV -44 : Mode 6. Translation latérale (E).....	128
FIGURE IV -45 : Mode 7. Translation latérale (E).....	129
FIGURE IV -46 : Mode 8. Translation latérale (E).....	129
FIGURE IV -47 : Mode 9. Translation latérale (E).....	130
FIGURE IV -48 : Mode 10. Translation latérale (E).....	130
FIGURE IV -49 : Mode 1. Translation longitudinale (N) .....	132
FIGURE IV -50 : Mode 2. Premier fléchissement vertical (Y).....	132
FIGURE IV -51 : Mode 3. Torsion simple.....	133
FIGURE IV -52 : Mode 4. Deuxième fléchissement vertical (Y) .....	133
FIGURE IV -53 : Mode 5. Double torsion du tablier.....	134
FIGURE IV -54 : Mode 6. Translation latérale (E).....	134
FIGURE IV -55 : Mode 7. Translation latérale (E).....	135
FIGURE IV -56 : Mode 8. Translation latérale (E).....	135
FIGURE IV -57 : Mode 9. Translation latérale (E).....	136
FIGURE IV -58 : Mode 10. Translation latérale (E).....	136

# **LISTE DES TABLEAUX**

## **CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

TABLEAU I-1 : Propriétés de fibres communes pour renforcements .....	21
TABLEAU I-2 : Fournisseurs de fibre de carbone au monde/Capacité de production .....	23
TABLEAU I-3 : Propriétés des différents types de fibres de verre .....	24

## **CHAPITRE II : MATERIAUX, ESSAIS ET PROCEDURES EXPERIMENTALES**

TABLEAU II-1 : Granulométrie du gravillon 3/8.....	47
TABLEAU II-2 : Granulométrie du gravier 8/15.....	47
TABLEAU II-3 : Autres caractéristiques des granulats .....	48
TABLEAU II-4 : Granulométrie du sable lavé .....	48
TABLEAU II-5 : Granulométrie du sable correcteur .....	49
TABLEAU II-6 : Granulométrie du sable rectifié choisi .....	50
TABLEAU II-7 : Autres caractéristiques des sables .....	51
TABLEAU II-8 : Coefficient Granulaire G, Méthode Dreux-Gorisse .....	52
TABLEAU II-9 : Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône .....	52
TABLEAU II-10 : Dénomination des affaissements selon la Norme EN 206-1 en mm. ....	52
TABLEAU II-11 : Correction en pourcentage d'eau en fonction de la dimension des plus gros granulats Dmax (correction si Dmax $\neq$ 25 mm) .....	54
TABLEAU II-12 : Valeurs des coordonnées pour la courbe de référence (OAB) .....	54
TABLEAU II-13 : Valeur du terme correcteur K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats.....	54
TABLEAU II-14 : Valeur du coefficient de compacité $\gamma$ .....	56
TABLEAU II-15 : Récapitulatif des détails des poutres renforcées par insertion CNTs.....	70
TABLEAU II-16 : Récapitulation des poutres réparées .....	71

## **CHAPITRE III : ANALYSE NUMERIQUE ET CHOIX DU LOGICIEL**

TABLEAU III-1 : Processeur disponible dans le logiciel ANSYS .....	74
TABLEAU III-2 : Coordonnées déformations– contraintes en différents points .....	79
TABLEAU III-3 : Caractéristiques mécaniques des lamelles CFRP.....	83
TABLEAU III-4 : Propriétés mécaniques de la résine époxy Sikadur 30 .....	84

TABLEAU III-5 : Caractéristiques mécaniques des composites avec CNTs .....	84
TABLEAU III-6 : Nombre d'éléments du maillage pour les poutres modélisées .....	86
TABLEAU III-7 : Nombre d'éléments discrétisés pour les poutres.....	89
TABLEAU III-8 : Nombre de nœuds du modèle choisi.....	93
TABLEAU III-9 : Nombre d'éléments du modèle choisi .....	94
TABLEAU III-10 : Différentes propriétés des composites utilisés .....	95

## **CHAPITRE IV : *RESULTATS ET DISCUSSIONS***

TABLEAU IV-1 : Récapitulatif des résultats de l'essai Pull-Off .....	98
TABLEAU IV-2 : Récapitulatif des résultats de réparation des poutres .....	105
TABLEAU IV-3 : Récapitulatif des résultats de la modélisation numérique des poutres renforcées..	118
TABLEAU IV-4 : Valeurs des fréquences du pont sans renforcement obtenues par ANSYS .....	119
TABLEAU IV-5 : Valeurs des fréquences du pont renforcé par matériaux composites traditionnels.	125
TABLEAU IV-6 : Valeurs des fréquences du pont renforcé par nano composites .....	131
TABLEAU IV-7 : Tableau des fréquences des différents cas de modélisation .....	137

## LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

ACI	: American Concrete Institute.
APDL	: Ansys Parametric Design Language.
AFRP	: Aramid Fiber Reinforced Polymer.
$\beta_t$	: Coefficient de transfert de cisaillement.
CFRP	: Carbon Fiber Reinforced Polymer (Polymère renforcé par fibre de carbone).
CNTs	: Carbon NanoTubes (Nanotubes de Carbone).
CC	: Chemin Communaux.
CW	: Chemin de Wilaya.
DTP	: Direction des Travaux Publics.
EB	: External Bonding (Collage Externe).
$E_c$	: Module d'élasticité (en MPa).
ES	: Equivalent de Sable.
$f_c$	: Résistance à la compression ultime (en MPa).
$f_{cm}$	: La résistance moyenne en compression à 28 jours [MPa].
GFRP	: Glass Fiber Reinforced Polymer.
MEF	: Méthode des Eléments Finis.
MEB	: Microscopie Electronique à Balayage.
$M_f$	: Module de Finesse.
MWCNT	: Multi Walled Carbon NanoTubes.
NSM	: Near Surface Mounting (Montage en surface).
PAN	: Polyacrylonitrile (Polymère).
PRF	: Polymère renforcé de fibres.
RN	: Route Nationale.
SWCNT	: Single Walled Carbon NanoTubes.
TCAC	: Taux de croissance annuel composé.
$\sigma_{c28}$	: La classe vraie du ciment à 28 jours [MPa].
$\gamma$	: Coefficient de Compacité.
$\nu$	: Coefficient de Poisson.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

Réparer, dans le domaine de génie civil, est une nécessité de nos jours, car toute structure se dégrade bien avant l'achèvement de sa durée de vie estimée et cela, est dû à de nombreuses raisons qui sont liées aux erreurs et anomalies d'exécution et des conditions environnementales. Réhabiliter est une éventualité dans des cas de changement d'usage ou mauvaise estimation des charges et efforts sollicitant la structure.

L'inconvénient des méthodes de réparation traditionnelles telles que l'augmentation des sections (ajout de matière), ou amélioration de portance (ajout de force) qui, en plus du coût élevé et parfois la complexité d'exécution sur une structure déjà en risque, génère un impact néfaste sur cette réparation et sur l'exploitation de la structure après remise en service. L'augmentation des sections (chemisage) donnera certainement une diminution des espaces exploitables pour le cas du bâtiment et une vue non esthétique pour le cas des ouvrages d'art (pont, tunnels), avec parfois un surplus de poids sur les fondations

La technique de réparation et/ou renforcement par matériaux composites étant une solution contemporaine dans le domaine de génie civil (bâtiment, ouvrages d'art), depuis les trois dernières décennies, avec une taille du marché mondial des composites de construction évaluée à 17 157,38 millions USDollar en 2020 et devrait enregistrer un taux de croissance annuel composé (TCAC) d'environ 6,14 % au cours de la période de prévision (2021-2026) [1]. La demande de matériaux composites augmente chaque année avec l'augmentation de son application dans diverses industries, avec la part la plus élevée pour la demande dans la région d'Asie-Pacifique en raison de la forte application dans les industries utilisatrices finales telles que la construction, l'automobile, l'électricité et l'électronique, l'aérospatiale et la défense, l'industrie, etc. Dans la perspective mondiale, le marché des composites s'élève à 90 600 millions USDollar en 2019 avec une projection pour atteindre plus de 131 600 millions USDollar en 2024 [2].

La littérature montre que les matériaux composites furent utilisés depuis les années 90 comme matériaux de réparation, en remplacement (solution alternative) des techniques classiques, comme le chemisage, la tôle collée, le béton projeté, qui ont montré des insuffisances et des limitations. On peut citer le renforcement du pont Fujimi à Tokyo (Japan) en 1993 ou le pont Russel à Kansas (USA) en 1996 et beaucoup d'autres en Canada, en Australie et en Europe et à partir de l'année 1998 en Algérie, pour les ponts "Bill Braguet" et Sidi Rached à Constantine, le pont blanc voûté "d'Alexandre" à El Harrach (Alger), etc. [3]. La technique de collage externe des lamelles et tissus en polymère renforcé de fibres (PRF) avec de la résine époxydique (adhésif) est avérée comme l'une des méthodes les plus efficaces pour le renforcement et réparation des éléments en béton armé [4]. Cependant, les performances mécaniques limitées de l'adhésif par rapport aux polymères renforcés de fibres, rendent cette technique parfois défailante car il y a provocation de décollement (déchirure) des composites de leur support (béton), surtout dans les zones à climat chaud et sec. C'est pourquoi, des recherches se sont penchées sur les remèdes à trouver à ce problème. Parmi les solutions, qui ont commencé à faire preuve, l'insertion des nanotubes de carbone (CNTs) dans la colle (résine) du composite.

La première synthétisation des nanotubes de carbone fut en 1991 par Iijima [5], qui a fait une révolution dans la production des matériaux composites et a permis au chercheur de faire un pas immense vers l'utilisation de la nanotechnologie dans les matériaux composites, en créant la nouvelle génération des "*nano-composites*". Ces derniers seront la star des prochaines décennies dans tous les domaines de l'industrie. De nombreuses recherches s'inscrivent dans le but de trouver un remède face au problème de délaminage des composites, et de proposer des solutions pour améliorer les résines époxy utilisées. Parmi ses solutions l'ajout des nano-composites (qui sont des composites de dimension  $10^{-9}$  mètre, dispersés d'une manière homogène dans la résine et ce, afin d'augmenter la surface d'interaction et de mieux distribuer les contraintes internes. L'intérêt majeur de l'emploi des nano-composites et en particulier les nanotubes de Carbone (CNTs), est bien l'amélioration observée des caractéristiques mécaniques des résines et matrices renforcés par ces derniers et qui peuvent être utilisés pour des applications divers dans l'engineering [6, 7].

Ce travail s'inscrit dans le but d'enrichir la littérature actuelle sur l'emploi des nouvelles générations des composites dans les diverses applications de génie civil, en étudiant l'influence de l'ajout des nanotubes de carbone CNTs dans la résine époxy utilisée pour le renforcement et/ou la réparation des éléments en béton armé. Pour cela, nous proposons un travail en deux volets ; une campagne expérimentale composée de deux catégories : la première catégorie concerne des poutres réduites en béton armé renforcées, sans aucun endommagement et la deuxième catégorie est composée de poutres réparées après endommagement préliminaire. Toutes ces poutres sont testées sous charge avec flexion à quatre points. Dans le de deuxième volet, on tentera une analyse numérique avec la méthode des éléments finis (MEF), via le logiciel de simulation Ansys 2022/ Méchanical APDL, permettant d'étudier le comportement linéaire et non linéaire des matériaux des éléments testés et ainsi caler les résultats expérimentaux trouvés par validation avec des discussions et commentaires. Une analyse numérique à vraie grandeur d'un pont à poutres en béton armé, dont les éléments du tablier ont été renforcées par matériaux composites avec des pourcentages d'insertion diverses des nanotubes (CNTs) dans la résine (adhésif). Un choix adéquat des éléments de la modélisation pour chaque matériau utilisé (béton, aciers, adhésif, composite, etc.) est fait.

Après une introduction générale, le premier chapitre est dédié à présenter une synthèse bibliographique sur les différentes pathologies qu'une structure peut subir durant sa vie, des méthodes de réparation traditionnelles et modernes, utilisées souvent par les experts ainsi qu'une genèse présentation des matériaux composites depuis leur première apparition jusqu'aux dernières générations. Une présentation synthétisée sur l'utilisation des nanotubes CNTs pour l'amélioration des résines qui convergent vers une réparation et/ou renforcement des structures en béton armé sera illustrée. Le deuxième chapitre portera sur le volet expérimental de notre travail, où on étudiera le comportement des différents poutres renforcées/ réparées avec des matériaux composites améliorés par ajout des CNTs à des pourcentages en poids qui varient entre 0.1 et 0.5 %, sous un chargement de flexion 4 points.

La modélisation numérique par la méthode des éléments (MEF), par le biais du logiciel commercial Ansys 2022/APDL, sera présentée dans le chapitre III. L'objet de cette dernière est de trouver un modèle numérique, capable de caler les résultats expérimentaux au laboratoire trouvés.

Le chapitre IV représente une concrétisation (numérique) de l'application des nanotubes CNTs dans le but d'améliorer les performances mécaniques de la résine et d'une manière globale celles du matériau composite pour le renforcement des éléments porteurs (du tablier) d'un pont à poutres en béton armé, se trouvant dans la province de Tipaza (70 Km à l'ouest de la capitale Alger). Pour cela, une analyse modale pour étudier le comportement dynamique de ce pont et voir l'influence des nanotubes avec les matériaux composites dans l'amélioration des modes et fréquences et fréquences de vibration de l'ouvrage.

La présentation des résultats de notre travail, expérimentale et numérique, suivie des commentaires et discussions sera portée dans le chapitre V.

Notre thèse sera finalisée par une conclusion générale ainsi que des recommandations pour futurs travaux convergeant dans ces axes de recherche.

**CHAPITRE I :**  
**SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

## SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

### **I.1 Introduction**

Cette étude bibliographique fait l'état de l'art des différentes pathologies pouvant atteindre les structures durant leurs vies, les causes et les principales techniques de réparation utilisées, ainsi qu'une genèse des matériaux composites à base de polymères comme solution innovante qui aident à procéder à la réparation et/ou le renforcement des éléments structuraux ayant subi des détérioration ou endommagements, pour retrouver leur capacité portante initiale et assurer leur stabilité (Fig. I.1). Avant de parler de réparation, de renforcement, de réhabilitation, de restauration ou bien rénovation, une brève définition nous aidera à bien distinguer entre ces approches techniques différentes [7,8].

#### a. La réparation

Principalement, la réparation d'une structure est le traitement des pathologies affectant cette dernière comme la corrosion, la fissuration ou autres en utilisant des techniques réglementaires.

#### b. Le renforcement

Lors du changement de l'utilisation d'une structure (augmentation des charges d'exploitation) ou perte de résistance ou ductilité, un renforcement est prévu afin de remettre la structure en état de service sans aucun risque.

#### c. La réhabilitation

C'est la mise en état d'utilisation une vieille construction ou un patrimoine architectural ou urbain délaissé suivant les normes de confort, d'hygiène et de sécurité afin de leur réutilisation, tout en conservant leurs caractéristiques patrimoniales.

#### d. La restauration

Pour un bâtiment de valeur historique, il y a lieu de les remettre en état identique. Il y a question de garder une fidélité à la conception initiale ainsi qu'aux matériaux utilisés à l'époque de gloire de la structure.

#### e. La rénovation

La rénovation est l'opération de démolition d'anciens bâtis dans le but de reconstruire d'autres neufs. On peut parler aussi de rénovation urbaine lorsque la rénovation atteint toute une ville.

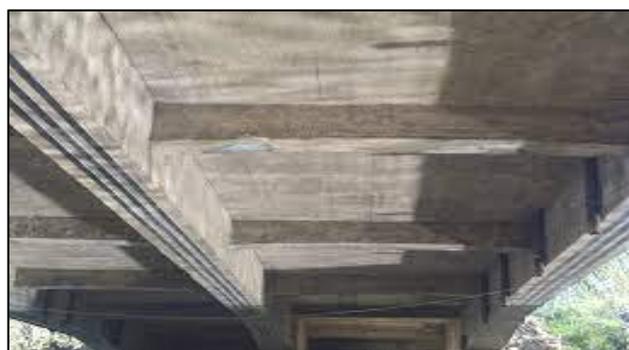


Figure I.1 Réhabilitation d'un pont à Oued Djeddi (Biskra)

## I.2 Patrimoine des structures en Algérie

L'Algérie dispose d'un patrimoine très important de structures de bâtiments, d'ouvrages d'art et de constructions hydrauliques et souterraines, dont un nombre très important de bâtis qui ont plus de 60 ans et qui nécessitent des entretiens et de maintenances urgentes [9].

### I.2.1 Secteur de l'Habitat

Pour le domaine de logements et habitations, sans compter le nombre de logements réalisés durant l'ère coloniale et après l'indépendance et qui se chiffre à des centaines de milliers, le secteur de l'Habitat, d'Urbanisme et de la Ville a affirmé la réalisation future de 3,6 millions de logements de différentes formules (Fig. I.2), pour les quinquennaux 1999-2004, 2005-2009, 2010-2014, 2015-2020 et 2021-2025, avec un budget global avoisinant les 5,8 milliards de Dinars Algériens. Selon les dernières statistiques, les livraisons, à ce jour, ont atteint le chiffre de 210 000 logements [10].



Figure I.2 Construction de logements AADL (Alger)

### I.2.2 Secteur des Travaux Publics

#### I.2.2.1 Chiffres statistiques

Le parc des infrastructures de base des travaux publics en Algérie est composé actuellement de [11] :

- Plus de 131.000 km de routes (Autoroutes, voies express, RN, CW et CC) ;
- 21 500 ouvrages d'art dont 11500 routiers et 10000 rails, avec 3478 ponts routiers sur l'autoroute est-ouest ;
- Plus de 130 ports (de plaisance, de pêche ou industriels) ;
- 55 aéroports, dont 36 ouverts à la circulation aérienne publique (CAP)

### I.2.3 Répartition des ponts en Algérie

Le pont, ouvrage d'art par excellence, occupe une place très particulière parmi les constructions, et son calcul, ainsi que son entretien exigent une spécification particulière, vu ces conditions de service et le rôle qu'il joue surtout dans les voies de communication. Le recensement national des ponts établi par le secteur des travaux publics, montre l'existence de plus de 21 500 ponts, répartis dans les 58 wilayas du territoire national. La répartition de ces ponts, selon la nature du matériau constituant (Fig. I.3), montre clairement le nombre très important des ponts en béton, avec un pourcentage de 48%, suivi des ponts en mixte et en maçonnerie (24%), les ponts en béton précontraint (14%) et les autres types (14%).

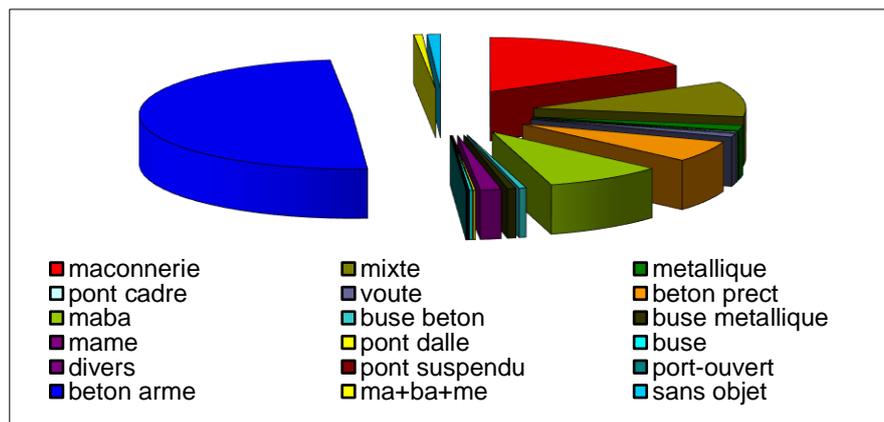


Figure I.3 Répartition des ponts selon le type du tablier

Les récents chiffres, concernant les ponts routiers répartis à travers les 58 wilayas du territoire, montrent que 70 % sont situés dans des zones de moyenne à forte sismicité (Fig. I.4) [12]. Les dernières statistiques, montrent que 35% de ces ponts nécessitent des entretiens et des interventions (réparations et réhabilitations) et ce, à cause des différentes dégradations observées et de la vétusté des éléments porteurs. C'est pourquoi, il est devenu nécessaire de trouver des solutions adéquates pour faire face à ce problème (Fig. I.5).

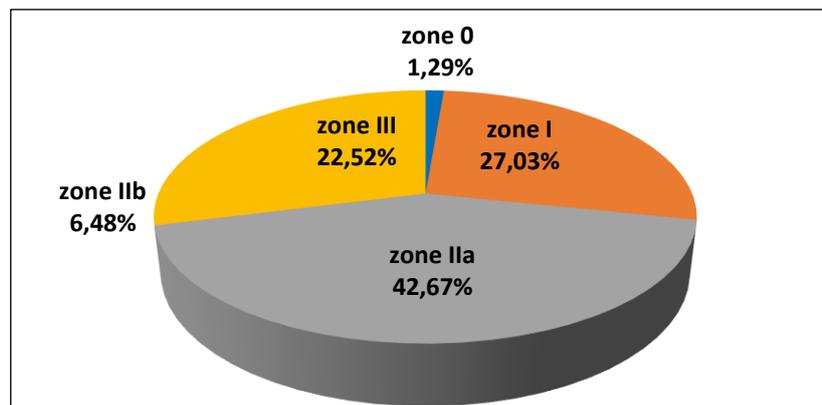


Figure I.4. Répartition des ponts par zone sismique en Algérie [12]

- Zone 0 : sismicité négligeable
- Zone I : sismicité faible
- Zone IIa : sismicité moyenne
- Zone IIb : sismicité élevée
- Zone III : sismicité très élevée

En effet, la Fig. I.5, illustre l'état physique des ponts, selon le travail établi par les différentes directions des travaux publics (DTP) des différentes wilayas. 49% en bonne état, 17% en état moyen et plus de 35% en état mauvais, ce qui a poussé les pouvoirs publics, à prendre des mesures de sécurité particulières, telles que les renforcements et les réparations et qui doivent être appliquées afin d'éviter toute rupture fragile causée par des effets dynamiques ou sismiques ou tous autres risques majeurs. On accordera la priorité aux ouvrages stratégiques, les ouvrages

se trouvant dans les grandes villes et les ponts autoroutiers en raison de leur importance pour les besoins de la sécurité civile et le maintien des communications d'urgence [13].

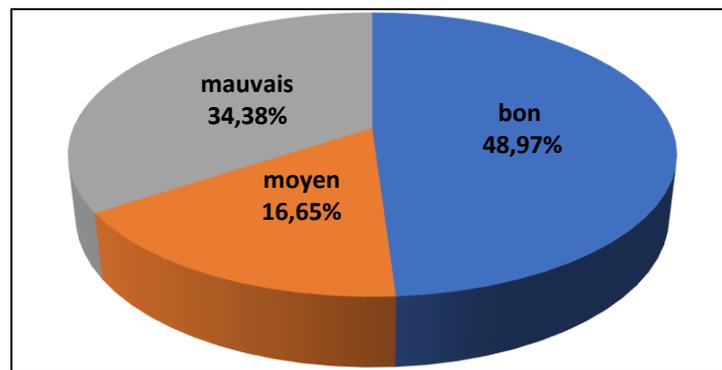


Figure I.5. Répartition des ponts selon leur état physique

### I.3 Réparation des structures en béton armé

#### I.3.1 Pathologie des constructions

L'évolution rapide de la construction dans les deux dernières décennies partout dans le monde, étant la force motrice de l'économie de plusieurs pays, a créé un énorme besoin de prévoir des interventions sur les structures atteints de pathologies durant leur vie de service [14]. La gravité de ces pathologies pour le béton armé varie selon le type de pathologie et son évaluation et propagation dans la structure, ainsi que la géométrie de l'ouvrage. Dans cette partie nous exposerons d'une manière détaillée les différents cas pathologiques survenus dans les éléments, particulièrement en béton armé, leurs causes ainsi que les méthodes de réparation pour remédier à ces derniers.

#### I.3.2 Types d'endommagements des structures

Le béton armé, né du besoin de pallier l'insuffisance de résistance du béton ordinaire aux efforts de traction contrairement à sa résistance trop élevée, en introduisant au béton une cage d'acier capable de reprendre ces efforts de traction [15], subit généralement les endommagements suivants :

##### I.3.2.1 La corrosion

La corrosion, source de risque majeure sur les structures de tous types en plus des vies de leurs utilisateurs, a un coût estimé de 2.5 trillions de dollars mondialement par an [16]. Plusieurs Chercheurs ont tenté de comprendre ce phénomène et savoir l'adoption de l'initiation à cette corrosion comme état limite pour définir la durée de vie des structures en béton armé. La phase de propagation de la corrosion est maintenant appréciée comme un élément significatif de la durée de vie des structures en béton armé et une bonne compréhension du processus de propagation est primordiale [17, 18]. En effet, le phénomène de corrosion des armatures dans le béton armé est défini comme une réaction électrochimique entre l'acier et les agents agressifs qui pénètrent dans le béton altéré entraînant la dégradation du matériau, perte de ces propriétés et jusqu'à l'éclatement du béton d'enrobage [19]. La fatigue due à la corrosion est très préjudiciable et la sécurité et la fiabilité sont fortement menacées par les effets combinés des corrosions environnementales et des dommages dus à la fatigue induite par les véhicules, qui peuvent éventuellement conduire à une défaillance catastrophique [20]. Les conséquences de

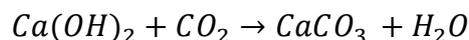
l'effet dévastatrice de la corrosion sont très nombreuses, comme ce fut le cas de l'effondrement du pont 'Silver Bridge' reliant Point Pleasant (Virginie-Occidentale) à Gallipolis (Ohio) au USA en 1967 (Fig. I.6), causant la mort de 46 personnes et des pertes avoisinant des millions de dollars [21].



Figure I.6 Vue de l'effondrement du pont "Silver Bridge"

### I.3.2.2 La carbonatation des bétons

La carbonatation du béton est un phénomène néfaste pour le béton et les armatures, causé par la présence du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ) dans l'air, dans sa forme gazeuse, qui pénètre dans le béton à travers des porosités et éventuellement des fissures et qui, à la présence d'eau dans les micropores, entre en réaction chimique avec la pâte de ciment hydratée transformant l'hydroxyde de calcium  $Ca(OH)_2$  ou la portlandite en carbonate de calcium  $CaCO_3$  [22].



Ces modifications sur le béton et l'acier de renforcement entraînent une perte de ductilité de la structure et par la suite diminuent leur capacité sismique.

### I.3.2.3 La fissuration

La fissuration est la pathologie la plus courante pour le béton armé, pratiquement impossible de l'éviter de nos jours, avec des dizaines de causes pouvant l'expliquer. Beaucoup de chercheurs ont parlé de la notion de fissures pathologiques (Fig. I.7), au-delà de 0.3 mm pour le béton armé [23, 24].

Les fissures selon leurs types peuvent être divisées en trois catégories :

- Les microfissures : ce sont des fissures très fines, non détectable à l'œil nu de largeur inférieure à 0.1 mm.
- Les fissures visibles : ce sont des ouvertures plus-ou-moins linéaires de largeur supérieure à 0.1 mm.



Figure I.7 Vue de fissuration du béton [24]

- Le faïençage : c'est un réseau de microfissures qui affecte principalement la couche superficielle du béton.



Figure I.8 Faïençage du béton [25]

Les fissures sont classées, selon leur évolution, en trois catégories principales : Les fissures passives, qui sont les fissures dont l'ouverture ne varie pas dans le temps quel que soit les conditions de température ou de sollicitation de l'ouvrage, Ces fissures sont très rares. En deuxième position il y a les fissures stabilisées, lorsque leur ouverture varie dans le temps en fonction de la température. Enfin les fissures actives ou évolutives, lorsque leur ouverture continue à évoluer indépendamment des cycles de température.

### I.3.3 Causes d'endommagements des structures de béton

Les causes des différents endommagements les plus fréquents des structures en béton armé sont très nombreuses, classées selon leurs origines en quatre catégories essentiels liées aux phases de vie de la structure [26, 27] :

#### I.3.3.1 Les causes liées aux défauts de conception et calcul

L'humain est susceptible à l'erreur, et ce sont ses erreurs qui influencent sur la durabilité d'une structure. Parmi les défauts de conception et calcul on a :

*Erreurs de conception :*

- Mauvais choix des matériaux de construction.
- Type de structure inadéquat à l'utilisation prévue.
- Mauvais choix des différents systèmes assurant la bonne utilisation de la structure (par exemple un système de drainage inadéquat ou mal placé).
- Non-respect des règles et exigences de construction.

*Erreurs de calcul :*

- Erreurs des hypothèses de calcul.
- Erreurs dans la modélisation numérique.
- Mauvaise utilisation des règlements.
- Etude incomplète ou erronée (note de calcul, plans d'exécution)

**I.3.3.2 Les causes liées à l'exécution et la réalisation**

Une réalisation faite aux règles de l'art assure une bonne résistance et ductilité pour la structure. Autrefois, la possibilité d'occurrence des défauts est toujours présente, ces erreurs se résument dans :

*Défauts en relation avec les documents d'exécution :*

- Mauvaise interprétation ou non-respect des documents d'exécution.
- Négligence de documents techniques orientant l'exécution de façon réglementaire.
- Vérification non rigoureuse des plans par l'organisme de contrôle.

Défauts en relation avec le contrôle de qualité :

Le contrôle des matériaux de construction, ainsi que la qualité et les consignes d'exécution est une nécessité, les erreurs de contrôle peuvent se résumer suivant le matériau et l'outillage comme suit :

a. Le béton :

- Non-conformité du béton utilisé avec la formulation exigée par le bureau d'études.
- Mauvaise mise en œuvre du béton (vibration insuffisante, hauteur de chute réglementaire ...etc.).
- Décoffrage prématuré.
- Stockage inapproprié du ciment lors de malaxage sur chantier.
- Manque d'arrosage et évaporation rapide d'eau.

b. Les armatures :

- Ferrailage non-conforme aux plans d'exécution.
- Scellement insuffisant, soudure pour assurer la continuité, coudure non réglementaire ...etc.
- Nuance d'acier.
- Stockage des bars sans préventions contre la rouille.
- Densité de ferrailage compliquant l'ouvrabilité du béton.

c. Le Coffrage :

- Tassement du coffrage.
- Non revêtement du coffrage afin d'éviter l'absorption d'eau et par la suite gonflement du bois.
- Joint non serrés causant l'ouverture du coffrage.

d. La maintenance :

Une maintenance régulière de la structure, en plus d'être une responsabilité de l'organisme de contrôle, peut éviter l'apparition de plusieurs dégâts durant l'exploitation de la structure :

- Nettoyage des joints et des différents systèmes d'appuis.
- Contrôle de l'étanchéité.
- Repérage des fissures avant développement et propagation sur toute la structure.

### I.3.3 Causes liées aux actions et surcharges mécaniques

Une structure est dimensionnée pour résister à des charges déjà définies (avec marge de sécurité), mais cette dernière peut subir durant sa vie des actions supplémentaires pouvant être critiques pour sa résistance, de ces actions nous citons :

#### Actions permanentes :

- Sous-estimation du poids des équipements de l'ouvrage.
- Rajout d'éléments structuraux non pris en compte dans le calcul.

#### *Actions d'exploitation :*

- Changement d'utilisation de l'ouvrage.
- Non-respect des consignes de service (citernes d'eau dans les terrasses inaccessibles...etc.)

#### *Actions accidentelles :*

- Occurrence de séismes dévastateurs.
- Chocs ou explosions massives.
- Incendies.



Figure I.9 Eclatement du béton due à un choc [28]

### I.3.3.4 Causes liées à la dégradation des matériaux

Le béton armé est un matériau dit "composite", constitué de béton et d'armatures HA et doux. Ces matériaux porteurs se dégradent selon le cas, on distingue :

#### *- Dégradation du béton :*

Le béton est un matériau poreux et les pores permettent la pénétration d'eau, de gazes et d'agents agressifs dans le système capillaire favorisant l'altération de ce dernier. Les désordres, qui surviennent sont selon leurs types et sont classés comme suit :

- Dégradations d'origine physique (gel-dégel, gradient de température).
- Dégradation d'origine chimique (carbonatation, attaques sulfurique, alcali-réaction).
- Dégradation d'origine physico-chimique (retrait plastique).
- Dégradation d'origine mécanique (phénomène d'abrasion et d'érosion)



Figure I.10 Vue de fissures dues au retrait au béton

### - Corrosion de l'acier

Les armatures sont protégées des éléments agressifs par le béton qui les enrobe, mais dans les cas de détérioration du béton l'acier se trouve dans une situation de risque.

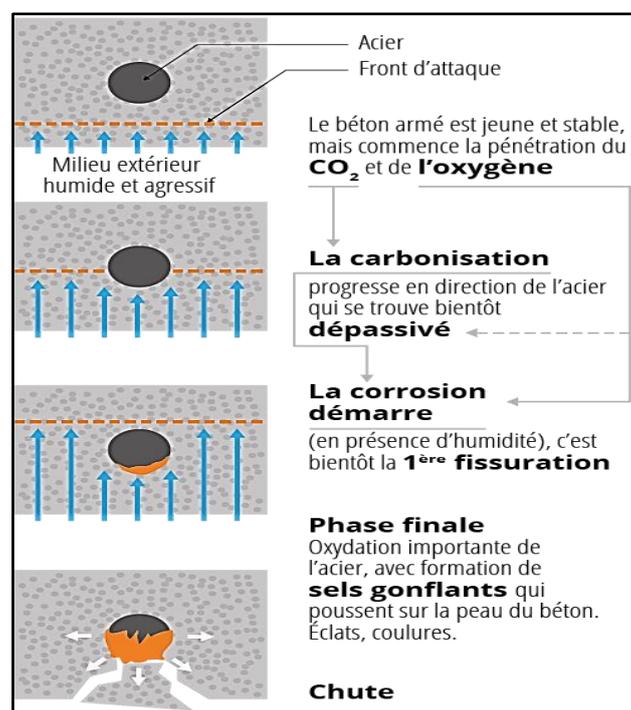


Figure I.11 Etapes d'occurrence de la corrosion [29].

Les causes de la corrosion des armatures sont nombreuses (Fig. I.12), nous citons :

- Béton très poreux permettant l'accès des agents agressifs, la source de la porosité varie entre :
  - Mauvaise formulation du béton (rapport E/C, granulométrie ...etc.)
  - Vibration insuffisante du béton lors du coulage.
  - Coulage par temps sec et chaud sans protection de surface du béton frais.
- Insuffisance du béton d'enrobage.
- Carbonatation du béton.
- Présence de fissures dans le béton d'où la pénétration des gazes et d'eau est possible.



Figure I.12 Corrosion avancée de l'armature HA [29]

### I.3.4 Méthodes de réparation et de renforcement des structures en béton

Prévoir une réparation durable ou un renforcement adéquat pour des structures en BA repose principalement sur deux facteurs : le bon choix des matériaux de réparation appropriés et la bonne exécution des techniques de réparation. Parmi les différentes techniques de réparation souvent employées par les experts, ces catégories citées par la suite sont les plus importants. On note les traitements de surface, la protection des armatures et du béton, la régénération des matériaux, l'ajout de force et l'ajout de matière.

#### I.3.4.1 Traitement de surface

Pour des défauts apparents il y a lieu de prévoir des opérations de réparation sur ces surfaces ou la pathologie est visible, parmi ces opérations :

\* *Le ragréage* :

Le ragréage, par définition, est l'opération consistant à mettre un enduit de finition sur une surface maçonnée brute, neuve ou restaurée dans le but de l'aplanir. Elle s'appuie sur des mortiers qui rattrapent les imperfections et les dénivelés. Dans le cas d'une réparation, le ragréage est la phase finale. Avant, il faut prévoir un décapage du béton altéré pour assurer une bonne adhérence, traitement ou remplacement des barres d'acier pour éliminer la rouille. Finalement on doit reconstruire l'enrobage via les produits adéquats.



Figure I.13 Ragréage après traitement de corrosion des armatures

**\* Injection des fissures :**

Selon les caractéristiques des fissures (âge, tracé, ouverture et profondeur) on distingue deux catégories de traitement par injection :

- Les traitements superficiels :

C'est des traitements visant la restauration de l'étanchéité perdu et éviter la corrosion. On peut citer : le calfeutrement, le pontage et l'imprégnation.

- Les traitements de masse :

Ces traitements consistent à injecter un produit liquide dans les fissures et qui, après durcissement, aura des caractéristiques mécaniques voisines de celles du matériau environnant.



Figure I.14 Mécanisme d'injection des fissures

**I.3.4.2 La protection des armatures et du béton**

Il est nécessaire dans toute réparation de protéger les éléments porteurs de la structure, pour cela on a recours à :

**\* Protection du béton :**

Afin de protéger le béton il y a lieu de prévoir l'ajout d'un mortier fraîchement déposé pour remédier à la porosité trop élevée du béton ou manque d'enrobage, ou l'utilisation d'autres produits pour assurer l'isolation vis-à-vis les attaques extérieures. Ces produits peuvent être classés comme suit :

- Les hydrofuges de surface : un traitement hydrofuge est un traitement incolore, destiné à réduire les pénétrations d'eau sous forme liquide tout en ne modifiant pas ou peu, la perméabilité à la vapeur d'eau (représentant la 'respiration' du matériau).
- Les minéralisateurs : ce sont des produits qui donnent des microcristaux par la réaction entre les atomes de silicium qu'ils contiennent et le calcium contenu dans la chaux du ciment.
- Les peintures : l'utilisation de certaines peintures à base de différentes résines époxydiques comme revêtement peut garantir une certaine protection au béton.



Figure I. 15 Application d'hydrofuges de surface



Figure I.16 Pose de mortier pour assurer l'enrobage

\* *Protection des armatures :*

L'état des armatures dépend de l'état du béton autour, dans le cas où la corrosion atteint les armatures il faut prévoir une des solutions qui suit :

- La protection cathodique :

C'est un traitement qui consiste à abaisser le potentiel électrochimique des armatures de façon permanente à l'aide d'une anode installée sur la paroi ou dans l'enrobage du béton. Le courant est soit imposé via un générateur ou bien un courant galvanitique [16].

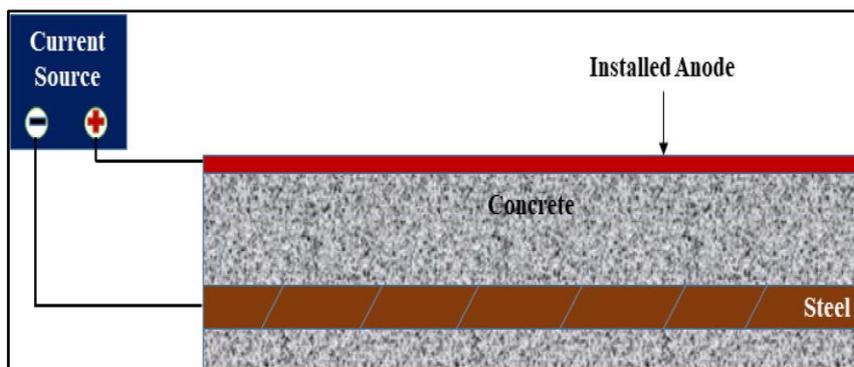


Figure I-17 Technique de protection cathodique [16].

- Les inhibiteurs de corrosion :

Ce sont des composés chimiques à base de nitrite ou benzoïques de sodium, qui prolonge la passivité de l'acier dans le béton en présence d'agents agressifs, s'ils sont appliqués sur les barres d'acier.

- Revêtement des armatures :

Un revêtement à base de résine époxydique par exemple, appliqué sur les armatures aidera à stopper la corrosion de ces derniers.

### I.3.4.3 La régénération des matériaux

Certaines techniques de réparation donnent une deuxième vie aux matériaux, leurs permettant de mieux travailler, parmi ces techniques, on peut citer :

- L'extraction des chlorures des bétons :

Cette technique est pareil que celle de la protection cathodique, avec deux différences majeures :

- La densité du courant utilisé pour la protection cathodique est moins importante que celle dans l'extraction des chlorures.
- L'anode installée pour cette technique est provisoire, contrairement à l'anode pour la protection cathodique qui est installée de façon permanente.

Une solution d'hydroxyde de calcium, hydroxyde de sodium et d'eau traité sont utilisés souvent comme électrolytes externes pour protéger la surface du béton de l'acidification [16].

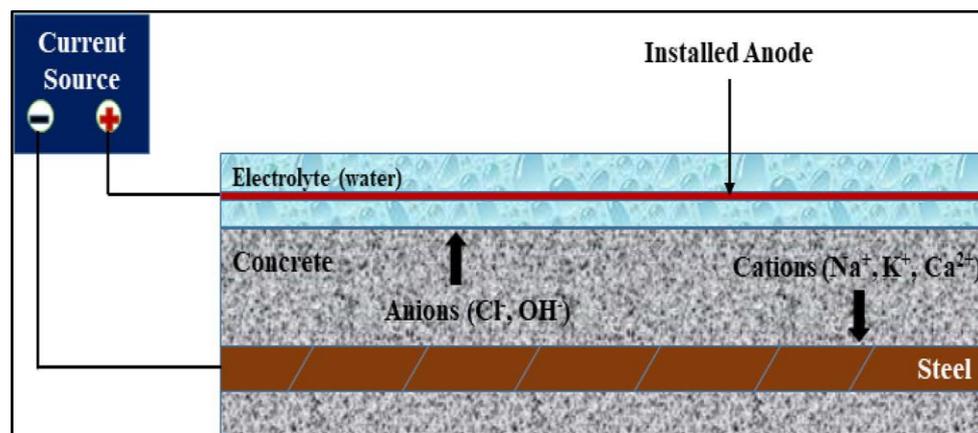


Figure I.18 Technique d'extraction des chlorures [16]

- La ré-alcalinisation des bétons :

La ré-alcalinisation permet d'augmenter l'alcalinité du béton, c'est-à-dire d'augmenter pH. Cela a pour conséquence que les armatures sont à nouveau protégées. La méthode de réalisation de la ré-alcalinisation est identique à celle de l'extraction des chlorures. Seul l'électrolyte utilisé change.

#### I.3.4.4 L'ajout de force

Cette méthode consiste à fortifier la structure et augmenter sa capacité portante via une précontrainte additionnelle, généralement extérieure, avec des câbles, barres ou mono-torons. Un traitement des fissures doit accompagner cette précontrainte pour assurer la leur fermeture. Selon le besoin, la précontrainte additionnelle visera la résistance vis-à-vis la flexion ou l'effort tranchant [30].



Figure I.19 Application d'une précontrainte additionnelle extérieure [30]

#### I.3.4.5 L'ajout de matière

Le problème majeur des structures étant la perte ou l'insuffisance de la section résistante aux efforts agissants sur la structure, la technique la plus répandue et l'augmentation de cette section via l'ajout de béton, d'armatures ou par collage de tôles [31]. Pour l'ajout de béton on distingue l'ajout par projection ou par coulage/ injection avec coffrage. Tandis que le chemisage a été depuis toujours la solution la plus pratiquée dans la réhabilitation des structures, les armatures sont rajoutées après préparation de la surface d'accueil et couvrent ensuite par du béton ajouté. Enfin la technique de collage des tôles, consiste à l'ajout d'armatures et du béton sont des techniques qui ont prouvées leur efficacité du côté résistance avec le temps, mais qui ont montrées par contre des inconvénients du côté ouvrabilité (vider les lieux, main d'œuvre pour préparer le coffrage et ferrailage, poussières et résidus après réparation ...etc.) et état de service (changement de géométrie, l'esthétique) sans oublier le coût et le surplus de poids ajouté par la structure sur la fondation. Le collage des tôles, au début en acier, a pu éliminer de nombreux inconvénients des méthodes classiques par sa simplicité de mise en œuvre [32].

#### I.3.5 Les matériaux composites comme matériau de réparation innovant :

Les tôles en acier collées aux éléments porteurs étaient pour des années la meilleure solution de réhabilitation pour regagner la résistance, leur utilisation répartie dans le monde entier, jusqu'à l'apparition du problème de corrosion. Le besoin d'un matériau résistant à la fois aux charges extérieures appliquées sur la structure qu'à la corrosion a visé les regards vers les matériaux composites. De plus de leur légèreté, simplicité de mise en œuvre et leur résistance élevée à la corrosion, les matériaux composites se sont montrés une bonne tenue mécanique comparable aux matériaux homogènes comme l'acier.

Dans la partie qui suit nous prendrons l'exemple des composites à base de polymères comme matériau de réparation innovant, exposerons d'une manière détaillée son historique, caractéristiques et utilisations dans le domaine de la réhabilitation.

## I.4 Composites à base de polymères

### I.4.1 Généralités

Un matériau composite, par définition classique, est un assemblage de deux composants ou plus avec des propriétés différentes qui se complètent pour créer un nouveau matériau avec un comportement amélioré [33]. De nos jours, le terme matériau composite réfère à un matériau contenant des fibres rigides continues ou discontinues qui représentent la phase discontinue du matériau, noyés dans une matrice moins solide qui est la phase continue de ce dernier.

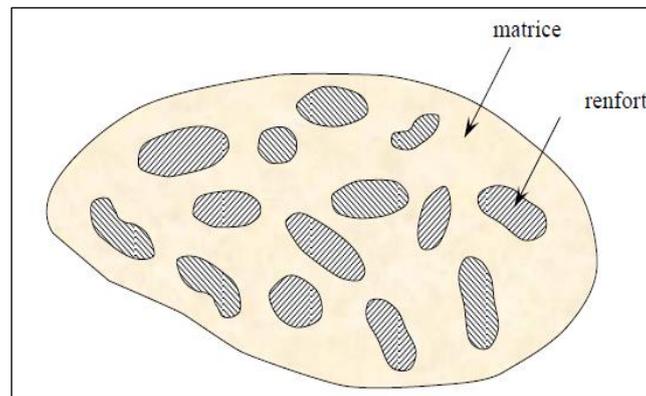


Figure I.20 Vue microscopique du matériau composite [33].

#### I.4.1.1 Caractéristiques des matériaux composites

Les caractéristiques d'un matériau composite résultent de :

- Propriétés des constituants de ce dernier.
- Distribution géométrique des composants.
- Interactions entre différents composants.

Ces caractéristiques s'expriment en hétérogénéité élevée et anisotropie très élevée.

#### I.4.1.2 Classification des matériaux composites

Les matériaux composites sont classés suivant deux critères : la forme des composants et la nature des constituants.

\* *Classification suivant la forme des constituants*

Pour le critère de la forme, on distingue deux grandes classes, les particules et les fibres.

##### *i. Les composites à particules :*

On dit composite à particule, lorsque le renfort utilisé se trouve sous forme de particules, ces derniers sont souvent utilisés pour améliorer certaines propriétés spécifiques et choisis selon la propriété à améliorer [34].



Figure I.21 Microbilles creuses en verre [34]

**ii. Les composites à fibres :**

Les composites à fibres sont des composites avec un renfort sous forme de fibres continues ou discontinues, courtes ou longues qui se différencient des particules par une dimension privilégiée que les autres. L'orientation des fibres joue un rôle crucial dans les propriétés du matériau résultant [34].



Figure I.22 Renforts en verre (fibres courtes et fibres longues) [34]

*\* Classification suivant la nature des constituants*

La classification des composites suivant la nature se fait selon le type de matrice utilisé ; on distingue :

- Les composites à matrice organique (résine) avec des fibres minérales, métalliques ou organiques.
- Les composites à matrice minérale (céramique) avec des fibres ou particules minérales ou métalliques.
- Les composites à matrice métallique (alliages légers) avec fibres métalliques ou minérales.

### I.4.2 Types de composites

Les matériaux composites sont utilisés dans des nombreuses disciplines, du transport et aérospatial, à l'engineering et emballage, passant par la construction et le domaine du génie civil. Parmi ces types de composants de matériaux composites nous citons :

*i. Les matrices :*

Les matrices les plus utilisés sont les matrices polymères qui se divisent en deux types :

- Les thermoplastiques : ce sont des matrices avec la propriété de se ramollir ou des fois fusionner une fois chauffée au-delà d'une température précise.
- Les thermodurcissables : les matrices les plus utilisées pour leur propriété de se solidifier d'une façon irréversible après chauffage.
- Les élastomères : des matrices polymères qui subit uniquement des déformations élastiques contrairement aux autres matrices qui subissent des déformations élastiques accompagnés d'une déformation plastique permanente.

*ii. Les fibres :*

Les fibres sont utilisées sous plusieurs formes, comme fibres courtes ou longues dispersés dans la matrice, des lamelles ou stratifiés, des tissus unidimensionnelles ou bidimensionnelles [35]. Parmi ses fibres nous citons :

- Fibres de verre.
- Fibres de carbone (HR ou HM).
- Fibres d'aramide ou Kevlar®.
- Fibres de boron.
- Fibres synthétiques minérales.
- Fibres naturelles

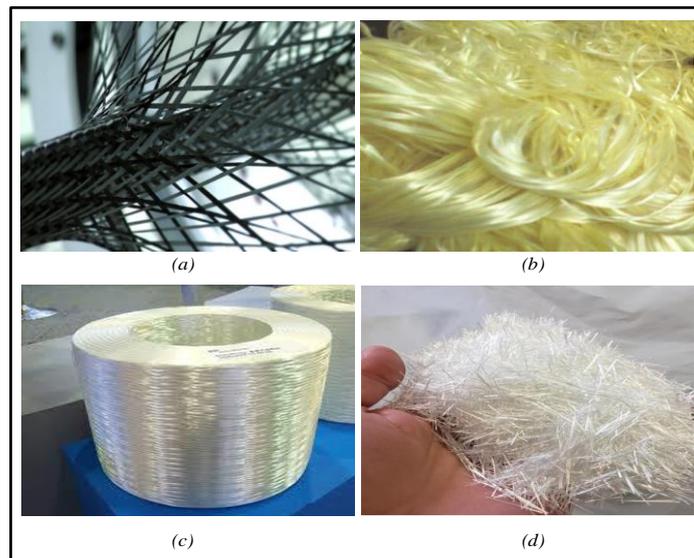


Figure I.23 : Différentes fibres (Carbone (a), Aramide (b) Bore (c) et Verre (d))

Ci après, le tableau récapitulatif des fibres communes destinées pour le renforcement [35]

Tableau I.1 : Propriétés de fibres communes pour renforcements [34]

Renforcement (fibres)	Diamètre d (μm)	Densité ρ (kg/m <sup>3</sup> )	Module d'élasticité E (MPa)	Module de cisaillement G (MPa)	Coefficient de poisson ν	Résistance à la traction σ <sub>rupture</sub> (MPa)	Allongement A (%)	Coefficient de dilatation thermique α (°C <sup>-1</sup> )	Coefficient de conductivité thermique λ (W/m °C)	Capacité calorifique c (J/kg °C)	Température limite d'utilisation T <sub>max</sub> (°C)	Prix (\$/kg)
Verre R, Haute performance	10	2500	86,000		0.2	3200	4	$0.3 \times 10^{-5}$	1	800	700	14
Verre E, Utilisation commun	16	2600	74,000	30,000	0.25	2500	3.5	$0.5 \times 10^{-5}$	1	800	700	2
Kevlar 49	12	1450	130,000	12,000	0.4	2900	2.3	$-0.2 \times 10^{-5}$	0.3	1400		70
Carbon (Graphite) HR	7	1750	230,000	50,000	0.3	3200	1.3	$0.02 \times 10^{-5}$	200 (20°C) 60 (800°C)	800	>1500	60-200
Carbon (Graphite) HM	6.5	1800	390,000	20,000	0.35	2500	0.6	$0.08 \times 10^{-5}$	200 (20°C) 60 (800°C)	800	>1500	
Boron	100	2600	400,000			3400	0.8	$0.4 \times 10^{-5}$			500	500
Alumine	20	3700	380,000			1400	0.4	$0.8 \times 10^{-5}$	50 (20°C) 7 (800°C)	900	>1000	
Silicate d'alumine	10	2600	200,000			3000	1.5					
Carbure de silicium	14	3000	400,000		0.14	2800	1.3	$0.4 \times 10^{-5}$	120	750	1300	600
Polyéthylène	12	960	100,000			2400	3.5	$1.3 \times 10^{-5}$	20		70	

### I.4.2.1 Polymères CFRP

Un Polymère Renforcé par Fibres de Carbone PRFC (CFRP en anglais “*Carbon Fiber Reinforced Polymer*”), est un terme utilisé pour décrire un matériau composite qui utilise un polymère comme matrice et des fibres de carbone comme renfort. En général, les composites CFRP utilisent des polymères thermodurcissables tel que les résines époxy, polyester ou vinyle ester comme matrice [36].

#### i. Les fibres de carbone :

C’est des fibres synthétiques de diamètre entre 5 et 10 micromètres se composant essentiellement d’atomes de carbone, qui représente une rigidité et résistance à la traction élevée, un rapport résistance/poids élevé et une faible dilatation thermique. Ces caractéristiques assurent une certaine stabilité structurelle permettant au matériau composite d’atteindre une dilatation quasi nulle pour des températures allant jusqu’à 300 C°, et en cas de protection contre l’oxydation, de résister à des températures aussi élevées que 2000 C° [37]. Les fibres de carbone à usage commercial sont dérivées de trois matières premières ou précurseur :

#### \* Polyacrylonitrile (PAN) :

Etant la base de la plupart des fibres de carbone produites dans le monde, la polyacrylonitrile est un polymère cohésif polymérisé par voie radicalaire, dure et rigide, résistant aux produits chimiques et solvants. Les fibres de carbone produites à base de polyacrylonitrile ont généralement une résistance plus élevée, résultant d’absence de défauts de surface.

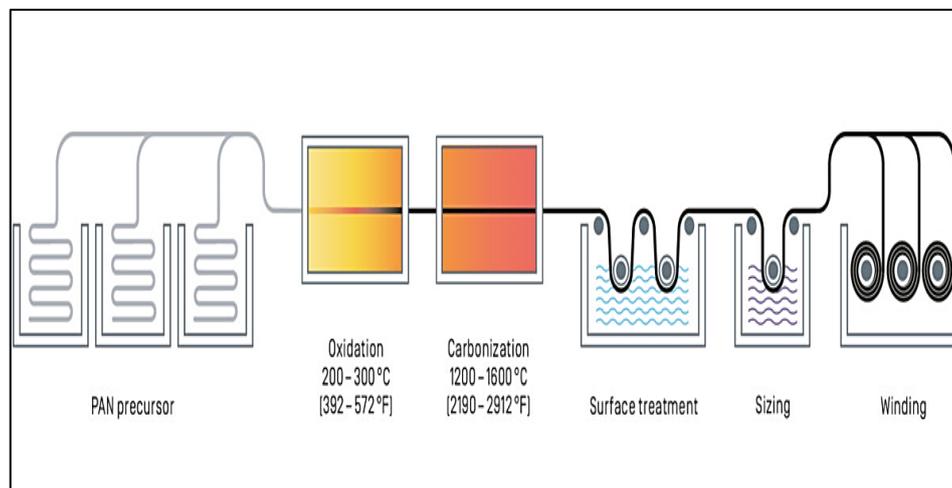


Figure I.24 Processus de production des fibres de carbone à base de PAN [34]

#### \* Rayonne (*La viscose*) :

La rayonne est une fibre synthétique à base de cellulose avec une structure moléculaire similaire à ce dernier. C’est l’une des premiers précurseurs utilisés pour la production des fibres de carbone due à sa disponibilité, mais avec un inconvénient majeur qui est la perte de poids ou faible rendement en fibres de carbone après carbonisation.

#### \* La poix :

La poix est une matière collante extraite principalement du raffinage des produits pétroliers ou cuisson du charbon, utilisé comme précurseur pour son prix bas et bon rendement. La production mondiale des fibres de carbone en 2022 est de l'ordre de 160 kt/Année avec une augmentation annuelle de 5% pour la dernière décennie, et une projection de croissance estimée d'un taux allant jusqu'à 8% d'ici 2031.

Tableau I.2 Fournisseurs de fibre de carbone au monde/Capacité de production [38]

Fabricant	Pays	2022 (kt)
Toray (incl. Zoltek)	Japan	55
Hexcel	USA	16
Mitsubishi Chemical Carbon Fiber & Composites	USA	16
Teijin	Japan	14
SGL carbon	Allemagne	13
Formosa Plastics	Taiwan	9
Solvay (Cytac)	USA	4.4
Dow/Aksa	USA/Turkie	3
Hyosung	Corée du sud	2
Divers	Chine	21.8
Divers	Reste du Monde	5
Total	Approximation	160

## ii. Avantages et inconvénients

Les composites CFRP par rapport aux autres composites à base de fibres de verre ou d'aramide présentent plusieurs avantages dont nous citons :

- Le poids léger : un composite CFRP avec un pourcentage en fibre de carbone de 70% du poids aura une masse volumique de 1,5 g/cm<sup>3</sup>, tandis qu'un composite traditionnel avec le même pourcentage en fibres de verre ou d'aramide aura une masse volumique de 1,8 g/cm<sup>3</sup>.
- Une résistance élevée : les CFRP montrent une résistance et rigidité élevée en comparant non seulement avec les autres composites GFRP et ARFP, mais aussi avec les métaux tel que l'acier et l'aluminium.

Cependant, ces derniers malgré leurs avantages précieux représentent des inconvénients tel que :

- La conductivité : contrairement au GFRP qui est isolant, le CFRP est très conducteur, cela peut être un avantage ainsi qu'un inconvénient selon l'utilisation du composite.
- Le prix : les composites à base de fibres de carbone sont 5 à 25 fois plus chers que les autres composites traditionnels, ce qui empêche les CFRP d'être les composites les plus utilisés dans le monde malgré leurs nombreux avantages.

### I.4.2.2 Polymères GFRP

Contrairement au CFRP, un GFRP ‘*Glass Fiber Reinforced Polymer*’, est un composite polymère qui se compose d’une matrice polymère et d’un renfort en fibre de verre, les fibres le plus utilisés pour leur coût modéré, haute résistance à la traction, aux éléments chimiques ainsi qu’au température.

#### i. Les fibres de verre

Avec des diamètres variant entre 5 et 24  $\mu\text{m}$ , les fibres de verre sont produites à partir de la fusion des silicates avec des oxydes métalliques tels que la silice, la potasse ou la chaux, donnant une masse fondue qui est passée à travers des douilles micro-fines et refroidie rapidement. Ces filaments sont souvent recouverts d’un revêtement pour minimiser les effets d’abrasion. Il existe plusieurs types de fibres de verre commercialisés selon le domaine d’application, tels que le E-Glass (Electrical Glass) qui est le plus couramment utilisé pour les matériaux composites pour sa bonne résistance avec un coût réduit, le S-Glass (Structural Glass) avec la plus grande résistance entre tous les types de fibres de verre mais avec un coût plus élevé due à la difficulté de fabrication de ce dernier, ainsi que le C-Glass (Chemical Glass) et le AR-Glass (Alkali-Resistant Glass).

Tableau I.3 Propriétés des différents types de fibres de verre [37]

Type de verre	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Résistance à la traction (MPa)	Module d’élasticité (GPa)	Constante diélectrique 1 MHz à 72°F	Elongation (%)
E-Glass	2,60	3445	72,4	6,33	4,8
S-Glass	2,49	4585	86,9	5,34	5,4
C-Glass	2,56	3310	68,9	6,90	4,8
AR-Glass	2,70	3241	73,1	8,10	4,4

### I.4.2.3 Polymères AFRP

Les Polymères renforcés par fibres d’aramide (*AramidFiberReinforcedPolymer*) sont des composites à base de fibres d’aramide, plus connues par leur nom commercial Kevlar®, produit sous licence de la société ‘Du Pont’ [37].

#### i. Les fibres d’aramide

L’aramide est une fibre polymère synthétique du nom ‘*Polyamide Aromatique*’ (de l’anglais ‘*AromaticPolyamid*’) obtenue par filage d’un mélange chimique liquide via des buses. Ces derniers présentes le meilleur rapport résistance à la traction/poids parmi toutes les fibres utilisées comme renfort pour les matériaux composites, et sont 43% plus légers que les fibres de verre et 20% plus légers que les fibres de carbone, en plus d’une excellente résistance aux chocs et abrasion, ainsi qu’au dégradation chimique et thermique.

Les inconvénients des fibres d'aramide sont leur faible résistance à la compression, à l'exposition aux rayons ultraviolets et la difficulté de façonnage et fabrication. Le Kevlar® est commercialisé sous trois types :

**\* Kevlar® :**

Avec des propriétés similaires à celles du Kevlar® 29, ce dernier est destiné pour le renforcement des caoutchoucs et pneumatiques.

**\* Kevlar® 49 :**

Un aramide avec le plus grand module et résistance à la traction, conçu pour la fabrication des matériaux composites.

**\* Kevlar® 29 :**

Utilisé principalement pour des applications industrielles, le Kevlar® 29 présente une résistance à la traction pareille à celle du Kevlar® 49, mais avec un module de traction de l'ordre de deux tiers de ce dernier.

### I.4.3 Générations des composites

Depuis la première application des FRP pour la réparation de la corrosion du pont 'Masuhoro' au Japon en 1977 et après vingt ans (20 ans) d'exploitation [39], les matériaux composites au polymère renforcé de fibres ont connu trois générations dont nous citons :

#### I.1.4.3.1 Première génération

Il s'agit du collage externe (EB) appelé 'External bonding' [40]. C'est l'une des premières méthodes de renforcement utilisée jusqu'à nos jours pour sa facilité d'application, d'où il suffit de bien préparer le support à renforcer ou réparer selon les recommandations de la Comité 440 de l'ACI, en s'assurant que les faces de ce dernier sont bien sablés et nettoyés de poussières et graisses ou résidus afin d'assurer la bonne adhésion entre support et FRP, et que les coins des sections non circulaires sont meulés pour éviter des zones de concentration de contraintes (Fig. I.25). Une couche de résine est appliquée sur le support préparé et les composites sous forme de lamelles ou fibres seront appliqués en une seule ou plusieurs couches selon la nécessité.



Figure I.25 Renforcement par Collage Externe des FRP [40]

L'inconvénient observé de cette méthode est le délaminage des composites sous l'effet des forts chargements ou de la température trop élevée due à la rupture de la colle.

### ***1.1.4.3.2 Deuxième génération***

C'est celle appelée "Montage En Surface NSM" (Near Surface Mounting). Pour faire face aux problèmes de la méthode externe (EB), la méthode NSM est appliquée en préparant des rainures avec les dimensions nécessaires sur le support à renforcer ou à réparer (Fig. I.26). Tout en s'assurant de la propreté de ce dernier selon les recommandations, une résine à deux composants est préparée et versée à moitié des rainures pour accueillir par la suite les renforcements en FRP et enfin remplir à niveau les rainures avec la résine restante [41].



Figure I.26 Utilisation de la technique "Montage en Surface" des FRP [41]

Malgré que le problème de délaminage soit bien évité avec cette méthode, la nécessité de prévoir trop d'aménagement et tâches destructifs impliquant l'intervention de main d'œuvre qualifiée ainsi un coût de réparation élevé reste un point noir pour cette méthode.

### ***1.1.4.3.3 Troisième génération***

Appelée la technique "Nano Composites", cette dernière fut inventée de l'idée des moustaches de graphène par Roger Bacon en 1958 [42]. A la création de filaments en carbone via des techniques de vaporisation par Morinobu Endo en 1978 [43], la véritable découverte des Nanotubes de Carbone (CNT's) fut en 1991 par Iijima révélé dans son fameux article 'Helical microtubules of graphitic carbon' [44], qui a fait une révolution dans la production des matériaux composites. Les CNT's sont des fibres de carbone ultrafines de diamètre de l'ordre du nanomètre se composant d'atomes de carbone dans un arrangement planaire-hexagonal, classés selon leur méthode de préparation en deux catégories :

#### ***\* Les CNTs à paroi simple SWCNT***

"Single Walled Carbon NanoTubes" (en Anglais). C'est des cylindres creux formés par une seule couche de graphène enroulée en soit même, avec un diamètre  $d \approx 1,35$  nm avec un début de transition de la phase structurale estimé à 2 GPa [45].

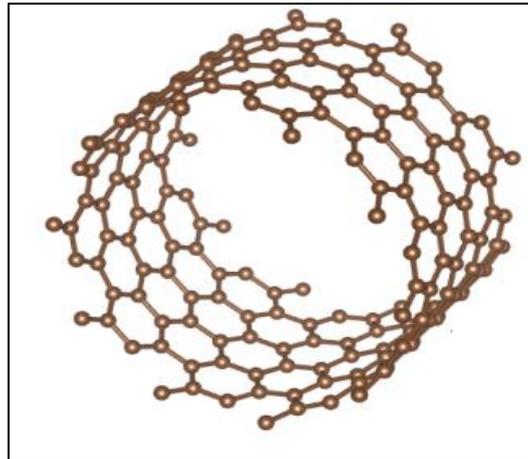


Figure 1.27 Nanotube de Carbone à Parois Simple [45]

\* *CNTs à Paroi Multiples MWCNT (Multi Walled Carbon NanoTubes)*

Contrairement au SWCNT, les MWCNT sont formés par l'enroulement de plusieurs feuilles de Graphène co-axialement formant un cylindre avec des parois distancées entre eux.

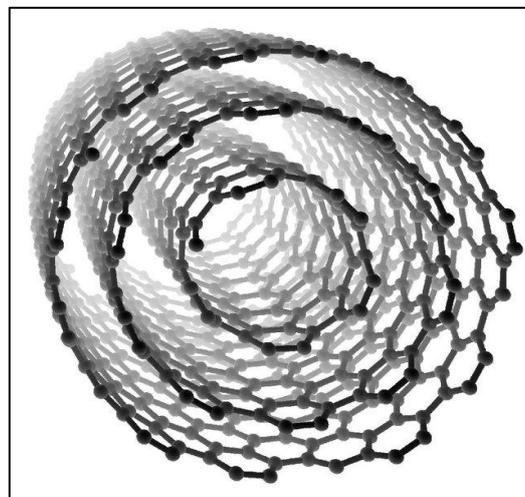


Figure I.28 Nanotube de carbone à parois multiples MWCNT [46]

Tous ces nano tubes de carbone (CNTs) peuvent atteindre jusqu'à 1TPa pour le module d'élasticité et 300 GPa pour la résistance à la traction, s'ils sont sans défauts.

## I.5 Historique et genèse d'application

L'application des différents nano composites a été largement étudiée dans la littérature pour des nombreux domaines. Nous nous concentrerons, dans ce paragraphe sur l'emploi de ces derniers pour l'amélioration des composites polymères dans le but de les intégrer dans le domaine de la construction, en se référant aux différentes recherches antérieures dans la littérature.

### I.5.1 La réparation et/ou renforcement des structures en béton par composites

L'emploi des Polymères renforcées de fibres est une pratique largement utilisée depuis des années. Très nombreux sont les chercheurs qui se sont intéressés à étudier l'effet d'utiliser des polymères renforcés de fibres sur le comportement des éléments en béton armé [47]. Outre les travaux effectués, pendant vingt-cinq (25) années, (ie. Entre les années 95 et 2020) [3], Des chercheurs comme Slaitas et Valivonis, ont étudié l'effet de la pré-tension des lamelles utilisés pour la réparation des poutres sans et avec charge extérieure appliquée (Fig. 29) . Trois séries de poutres dont testés sous flexion quatre points et l'ouverture et propagation des fissures est étudiée [48].

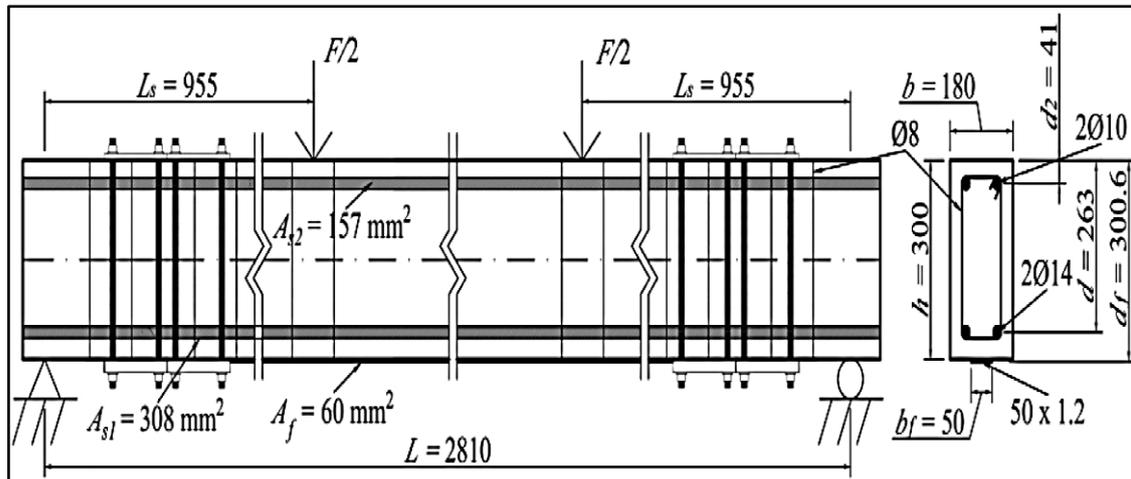


Figure I.29 Caractéristiques géométriques des poutres pré contraintes [48]

La largeur de fissure des éléments en béton armé non renforcés varie considérablement et lorsque l'élément est renforcé avant le chargement, le développement de la largeur de fissure est stable dès le début. Au contraire, lorsque l'élément en béton armé est renforcé sous l'action d'une charge externe, le développement de la largeur de fissure jusqu'à l'armature est instable, et l'armature en FRP l'a stabilisée et améliorée après précontrainte. Pendant la précontrainte, les fissures dans le béton sont fermées dans une certaine mesure, mais après la précontrainte, un saut dans la largeur des fissures peut être observé. Les fissures sont visibles après l'augmentation de la charge externe.

La dégradation progressive du joint adhésif et l'activation ultérieure des ancrages ont été observées dans les poutres de référence après la décompression. Le caractère linéaire descendant de la dégradation du joint adhésif est acceptable dans ce cas. Cependant, dans le cas des poutres renforcées par des stratifiés CFRP précontraints sous l'action d'une charge externe, une désintégration immédiate du joint adhésif et l'activation des ancrages sont observées après l'augmentation de la charge de post-préparation (Fig. I.30). Ceci révèle la différence de comportement du joint lorsque l'élément RC est renforcé sous l'action d'une charge externe et sans cette action.

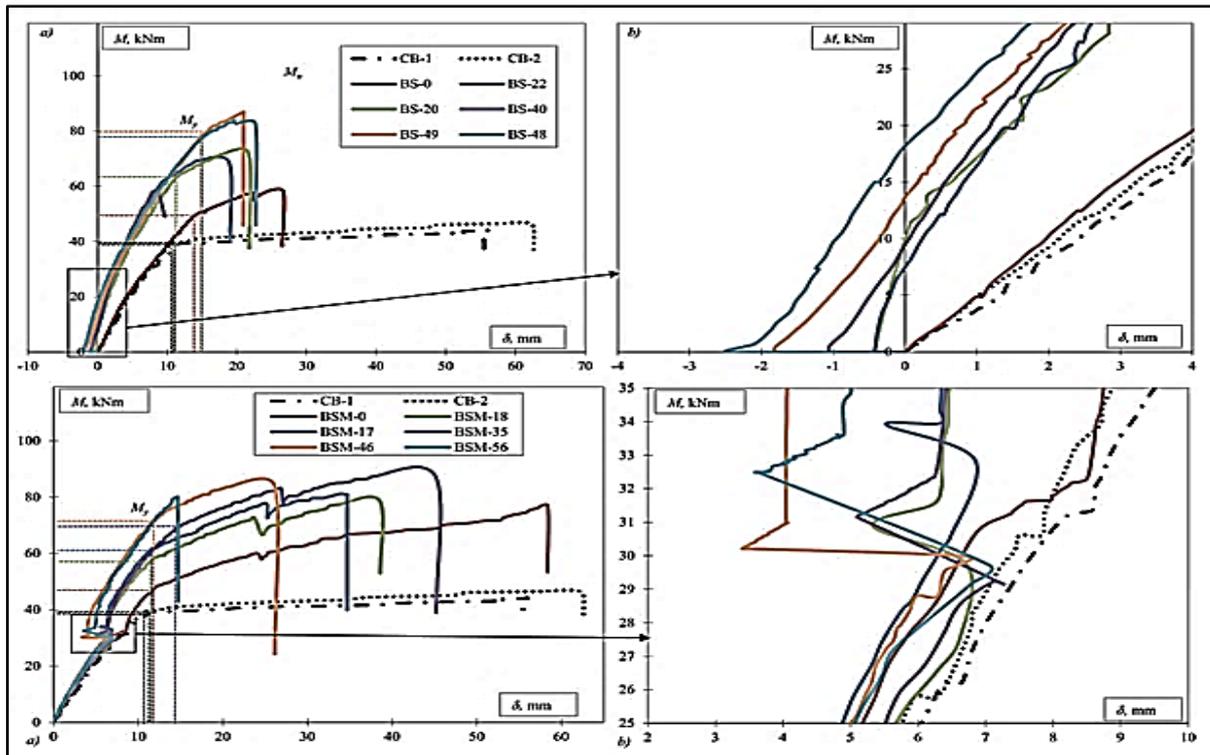


Figure I.30 Déflexion à mi-portée des poutres testées

Ali et al. [49] ont reportés l'influence du renforcement des poutres à travées continues par CFRP ou GFRP avec des essais de chargement monotone ont été réalisés en faisant varier le niveau de dommage des poutres, le type de matériau composite et l'épaisseur du renforcement. Cinq modes de rupture des poutres de renforcement ont été observés. Les résultats montrent que le moment de flexion ultime de la poutre peut être amélioré entre 14,8 et 26,6% dans le cas des poutres par le collage de feuilles de CFRP et entre 7,2 et 11,8% par le collage de feuilles de GFRP. La poutre, qui a été pré-endommagée sous un niveau de pré charge de 100% de la charge de rupture, peut être réparée comme une poutre RC continue renforcée (Figs I.31 and I.32).

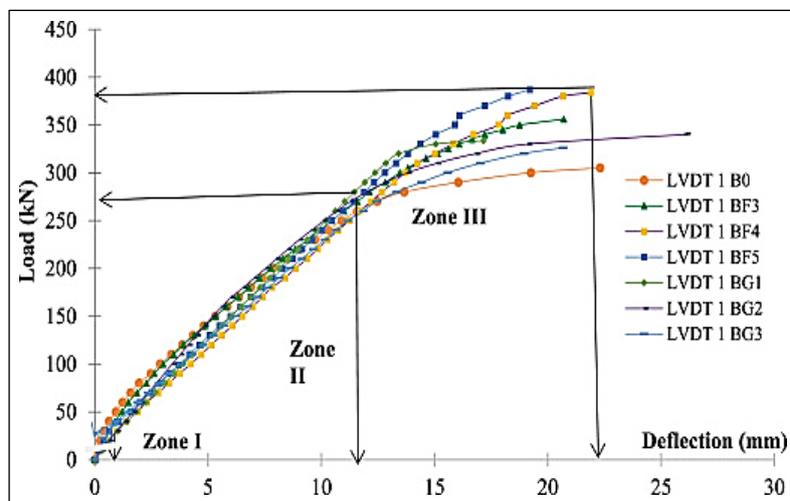


Figure I.31 Courbes charge-déformation [49]

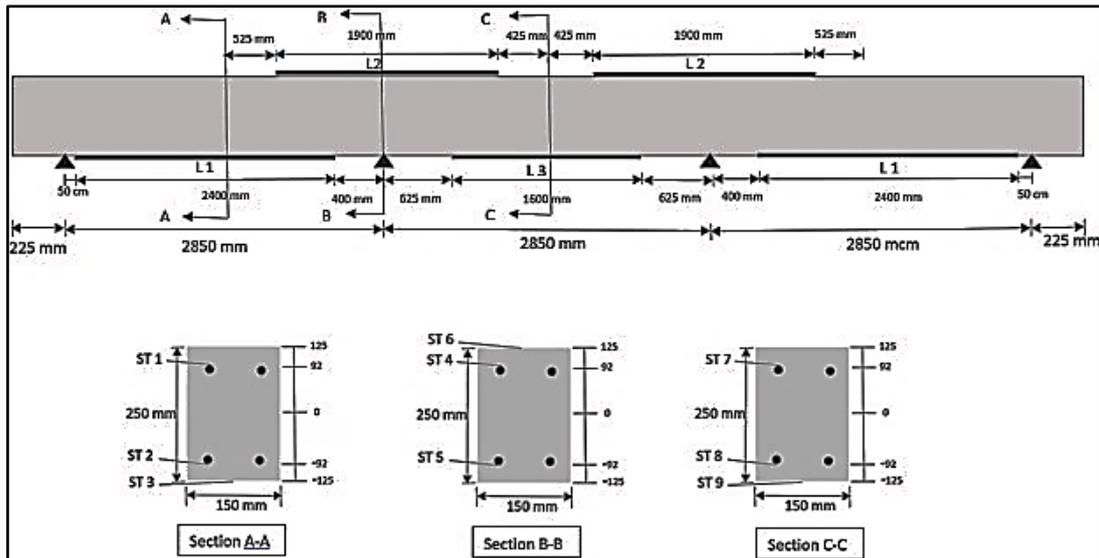


Figure I.32 Configuration de la poutre BA continue/ Position des jauges de contrainte [49]

Les travaux de J. Li [50] sur des poutres en béton armé renforcé par une, deux et trois couches de lamelles CFRP, respectivement, testés sous un essai de flexion trois points afin de déterminer l'influence de ce renforcement sur la résistance des poutres (Fig. I.33).

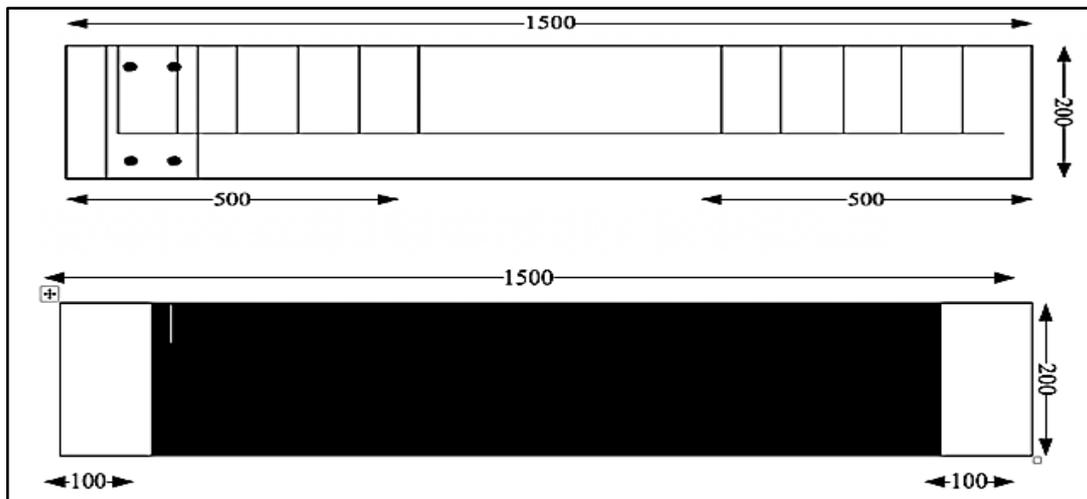


Figure I.33 Détails des poutres renforcées en mm [50]

En prenant l'exemple de la charge ultime, par rapport aux poutres Référence, les poutres renforcées avec une, deux et trois couches de lamelles CFRP ont augmenté de 7%, 19% et 23%, respectivement ; sous le même niveau de charge, la déflexion à mi- portée de la poutre a diminué et la capacité d'anti-déformation s'est améliorée de manière significative. Les résultats expérimentaux montrent que la lamelle de CFRP peut améliorer la capacité de charge des poutres et peut être appliquée dans l'ingénierie pratique.

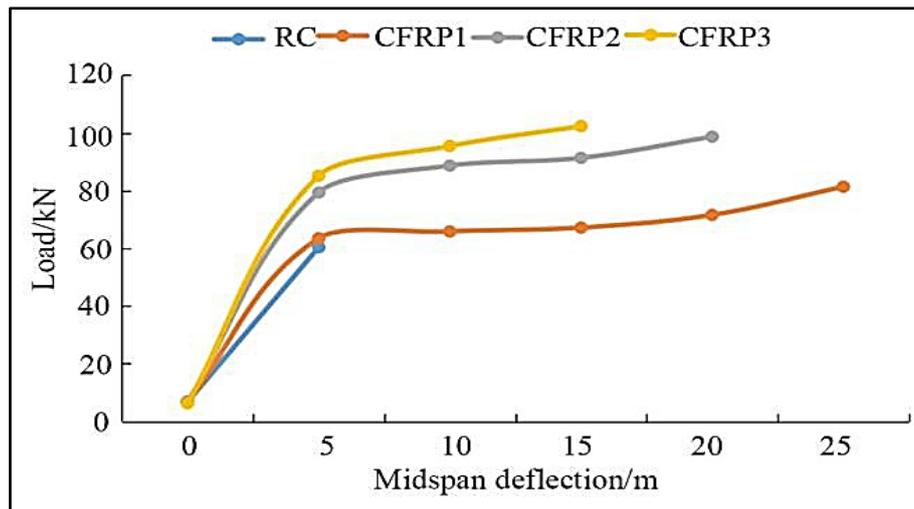


Figure I.34 Variation de la charge en fonction du déplacement pour poutres [50]

## I.5.2 L'amélioration de la résine (matrice) par ajout des nano charges

Plusieurs recherches ont été menées dans le but d'améliorer les propriétés des résines époxy par ajout de différentes nano charges tel que le carbone, la silice et les différentes argiles, afin de créer un composite inorganique hybride plus performant. Parmi ces derniers les nano-charges à base de carbone sont les plus largement utilisés pour leurs propriétés mécaniques, physiques et thermiques exceptionnelles [51-57].

### I.5.2.1 Les nanocharges à base de carbone

Il existe plusieurs nano-charges à base de carbone utilisés pour l'amélioration des matrices et résines, dont les plus couramment utilisés sont les nanotubes de carbone CNTs avec leurs trois formes ; soit à paroi simple "SWCNT's" (Single Walled Carbon NanoTubes), soit à paroi double "DWCNT's" (Double Walled Carbon NanoTubes), soit à parois multiples "MWCNT's" (MultiWalled Carbon NanoTubes). On trouve aussi, l'oxyde de graphène GO, les nano-plaquettes de graphèneGNP et les nano-feuilles de graphène GNS, ainsi que les nanofibres de carbone CNF (Fig. I.33).

#### a. Les nanotubes CNTs :

##### i. *Nanotubes de carbone à paroi simple SWCNT's :*

Plusieurs investigations ont montré l'efficacité des SWCNT's pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques des résines époxy, Ashrafi et al. [58], ont prouvé grâce à des essais pour mesurer la ténacité coupons de dimensions  $40 \times 9,5 \times 4,75 \text{ mm}^3$  découpés à l'aide d'une scie diamantée à partir des blocs coulés de résines époxydes pures et modifiées par des SWCNT's polymérisées à  $130 \text{ C}^\circ$  pendant 2 heures. L'incorporation de 0,1 % en poids de SWCNT a augmenté la résistance à la rupture inter laminaire en mode I et en mode II de 13 % et 28 % respectivement, la résistance à la compression après impact (CAI) de 3,5 %. Il a également entraîné une réduction de 5 % de la surface des dommages causés par l'impact. Les auteurs ont indiqué que les SWCNT ont contribué à l'augmentation de la résistance à la rupture par le pontage des fissures (arrachement et pelage) en Mode I et la formation de plus grands camails dans le Mode II.

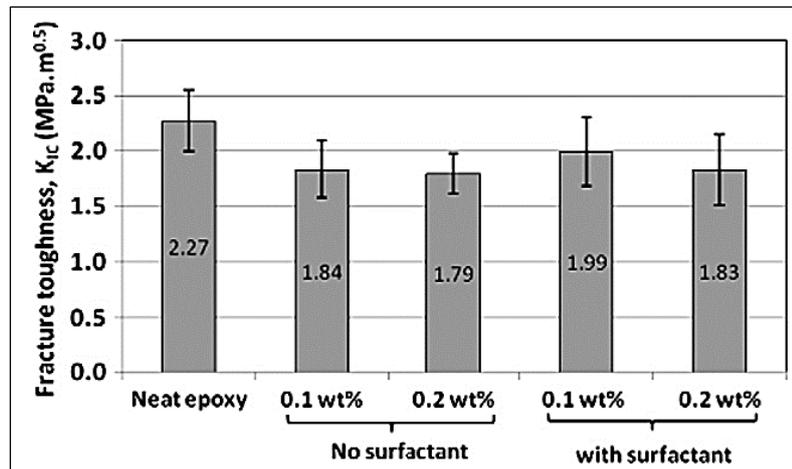


Figure I.35 Effet de l'ajout de SWCNT sur la résistance de la résine [58]

Feng et al. [59], ont aussi spécifiés que l'ajout des SWCNT's en grandes quantités (jusqu'à 39.1 wt%) dans des résine époxy montre une augmentation significative de la résistance à la traction (183%) et module de Young (408%), cela est attribué à la bonne dispersion des nanotubes dans la résine qui est bien observé à l'aide des images HRTEM (High Resolution Transmission Electron Microscopy).

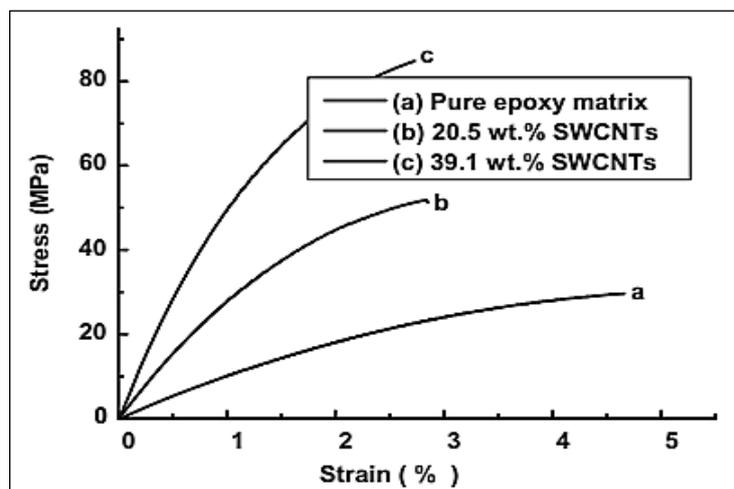


Figure I.36 Courbes contrainte-déformation de l'époxy pur et des composites SWCNT/époxy [59]

Des images microscopiques (imagerie en MEB) prises pour les surfaces de ruptures en traction des feuilles composites SWCNT, avec des pourcentages de valeurs 20.5% en poids et 39.1% en poids (Fig. I.37).

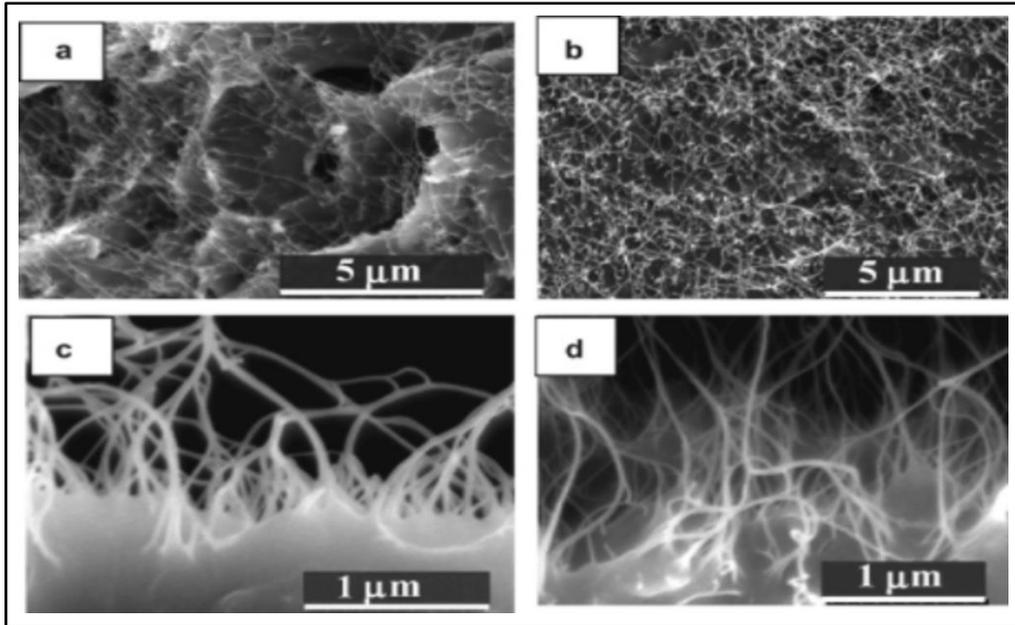


Figure I.37 Images MEB en vue de dessus (a, b) et en vue de côté (c, d) des surfaces de rupture en traction de feuilles composites SWCNT/époxy avec une charge de CNT de 20,5 wt% (a, c) et 39,1 wt% (b, d) [59].

**b. Les nanotubes de Carbone à Parois Multiples MWCNT's :**

D'autres part, les MWCNT's ont montrés leur potentiel autant qu'un ajout améliorant les caractéristiques des résines époxy à travers de nombreuses compagnes d'investigation [60-64] tel que les travaux de Jojibabu et al. [65] sur des échantillons de résine pure et modifiée par MWCNT's fonctionnalisés par l'ozon et deux types de copolymères tri-blocs testés avec différents essais mécaniques, tels que des essais de cisaillement à doubles plis, des essais de traction et des essais d'extension de fissures longues de type I.

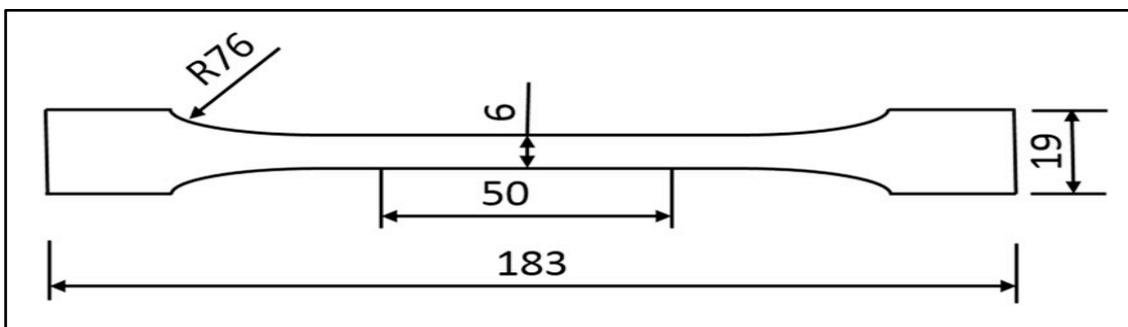


Figure I.38 Schéma et dimensions de l'éprouvette de traction en mm [65]

L'échantillon de résine époxy améliorée par 0.5 wt% de OZ-MWCNT's + SBM a montré une augmentation de la résistance lors de l'essai de cisaillement de 112% et amélioration de la déformation plastique ultime en cisaillement des adhésifs modifiés de 100 %. Les résultats des essais d'extension de fissures longues ont révélé une très forte augmentation de la ténacité en mode I de 1190 % pour ces joints hybrides (Fig. I.39).

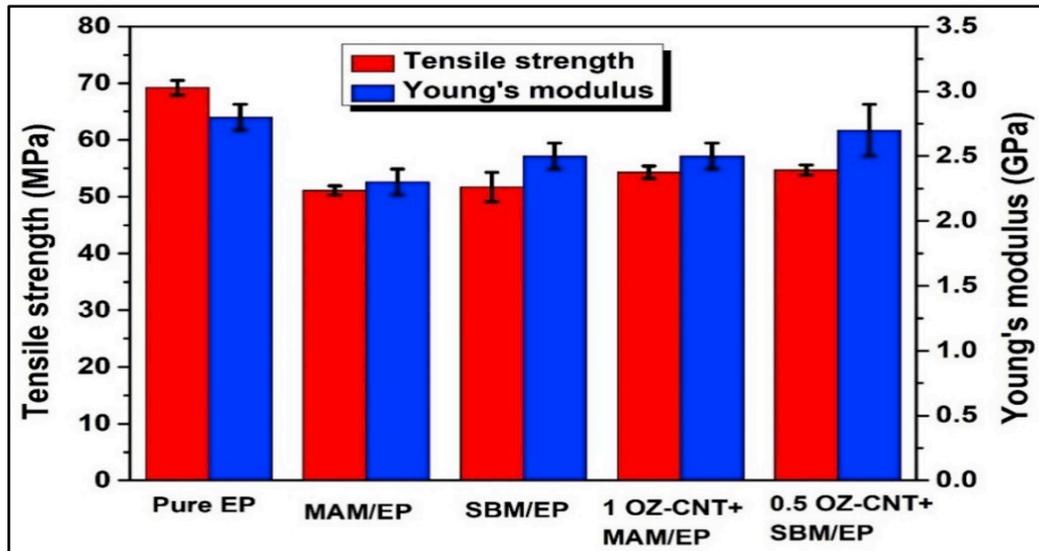


Figure I.39 Résistance de traction et le module de Young des résines époxy pures et nano composites [65]

Zielecki et al. [66], ont étudiés expérimentalement l'impact du renforcement des adhésifs à base de résines époxy par des MWCNT's sur la résistance à la fatigue de ces derniers. Pour cela trois époxy différents ont été étudiés. La synthèse des nano-renforts ainsi que la procédure de préparation de l'adhésifs ont été largement expliqués. Six (06) spécimens ont été préparés, deux variantes pour chaque modèle de résine l'un étant résine seule et l'autre avec ajout de 1% du poids de MWCNT's. Un essai de pelage sur un joint collé avec ces adhésifs a été conduit par l'application d'une charge cyclique sur le côté flexible des éléments collés via un inducteur de vibrations électromagnétique avec une fréquence maximale de signal généré de 4500 Hz. Le dispositif a été équipé d'un accéléromètre et un capteur de déplacement laser, le tout lié à un ordinateur (Figs I.40 et I.41).

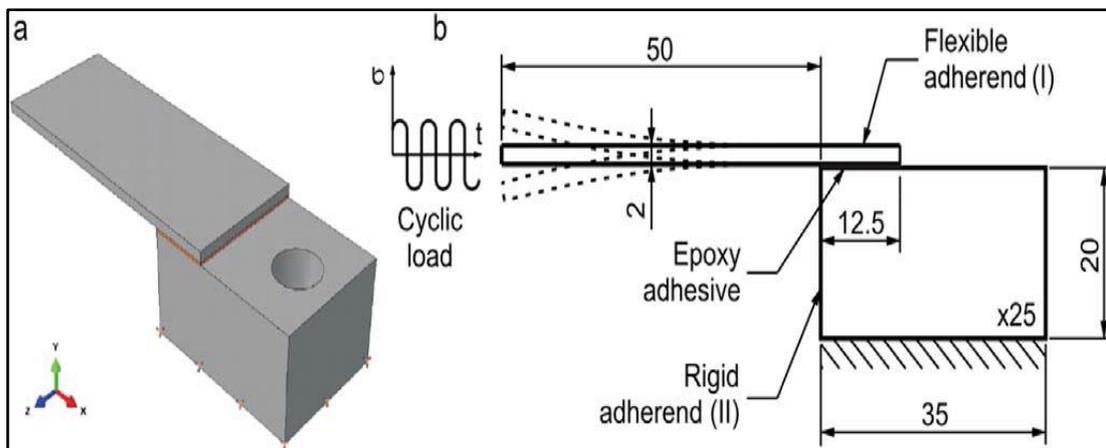


Figure I.40 Forme (a) et dimensions (b) de l'échantillon (test de résistance au pelage)[66]

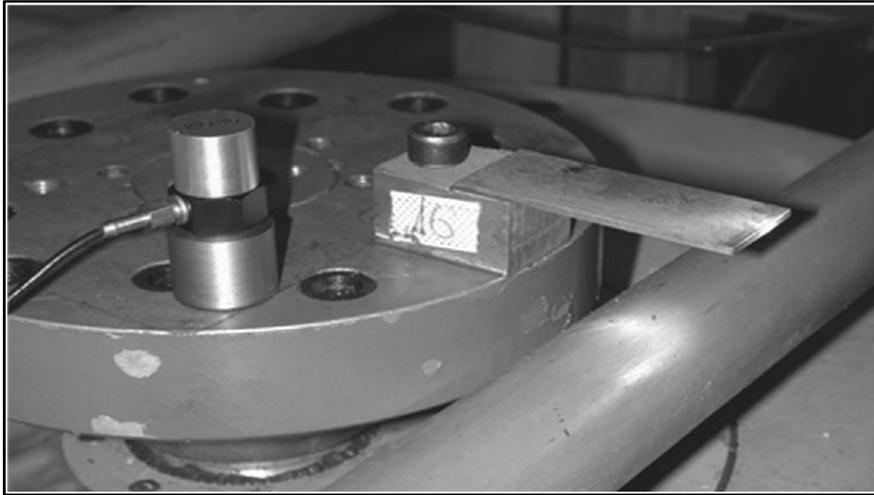


Figure I.41 Spécimen de joint monté sur l'inducteur électrodynamique [66]

Les résultats ont montré une amélioration de la résistance à la fatigue des adhésifs à base de résine époxy renforcée par seulement 1% en poids des MWCNT's et une prolongation de la durée de vie de l'adhésif (Fig. I.42).

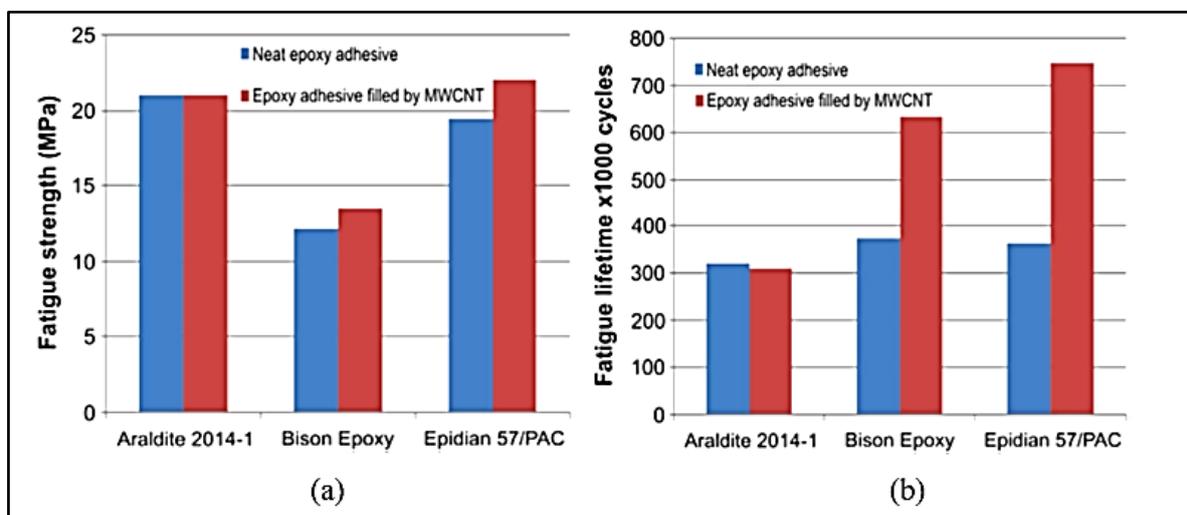


Figure I.42 Comparaison en fonction des variantes envisagées

(a) la résistance à la fatigue; (b) la durabilité à la fatigue [66].

Jojibabu P. et al. [67], ont étudiés les effets de différentes fractions de poids de CNT sur la résistance des joints époxy. La résistance maximale au cisaillement par recouvrement a été trouvée dans les joints CNT/époxy à 1 % en poids, ce qui était 53% plus élevé que celui du joint en époxy pur. Cependant, pour les articulations contenant 2% en poids de CNT, la résistance au cisaillement du recouvrement a été réduite de 48%. Cela s'explique par l'observation des surfaces de rupture des joints adhésifs (Fig. I.43).

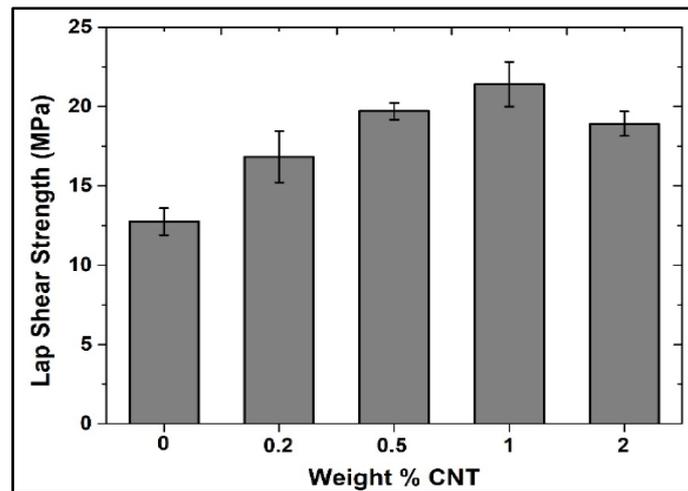


Figure I.43 Comparaison/résistance au cisaillement des CNT/fractions de poids [67]

Srivastava V.K. [68], a examiné l'effet de l'incorporation de CNT sur la résistance au cisaillement des joints de colle époxy. Une fraction pondérale de 3 % de CNT a été dispersée dans l'adhésif époxy par un broyeur à trois rouleaux à l'échelle du laboratoire. L'adhésif a été utilisé pour assembler des composites carbone/carbone (C/C) et carbone/carbure de silicium (C/C-SiC). La résistance au cisaillement par recouvrement a été augmentée de 25 % pour l'adhésif CNT/EP à 3 % en poids collé avec des substrats C/C-Si/C par rapport à l'époxy pur. Pour les joints composites C/C-SiC, la résistance du joint a été augmentée de 27% par rapport à celle des joints en époxy pure (Fig. I.44).

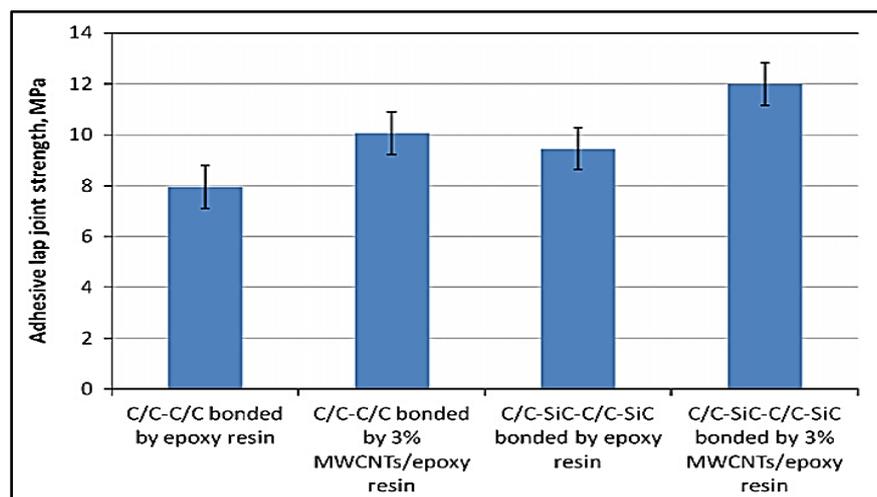


Figure I.44 Variation des joints de recouvrement adhésifs/composites C/C et C/C-SiC [68]

Morshed et al.[64], ont reportés, avec une série des essais de flexion 03 points sur des poutres en béton renforcés par CFRP et essais de traction uniaxiale sur des éprouvettes en résine, une amélioration du module élastique de 10% en ajoutant 10 wt% de MWCNT's à la résine époxy mais avec une diminution de 5% de la résistance de la résine probablement due à la mauvaise dispersion des MWCNT's dans la résine ce qui a introduit de l'aire et des vides dans les éprouvettes (Figs I.45 et I.46).

De plus, une légère diminution de l'élongation, par rapport à l'époxy pur, a également été observée. Cette diminution était potentiellement due à l'effet raidissant des nanoparticules sur l'époxy, qui a limité la capacité de déformation.

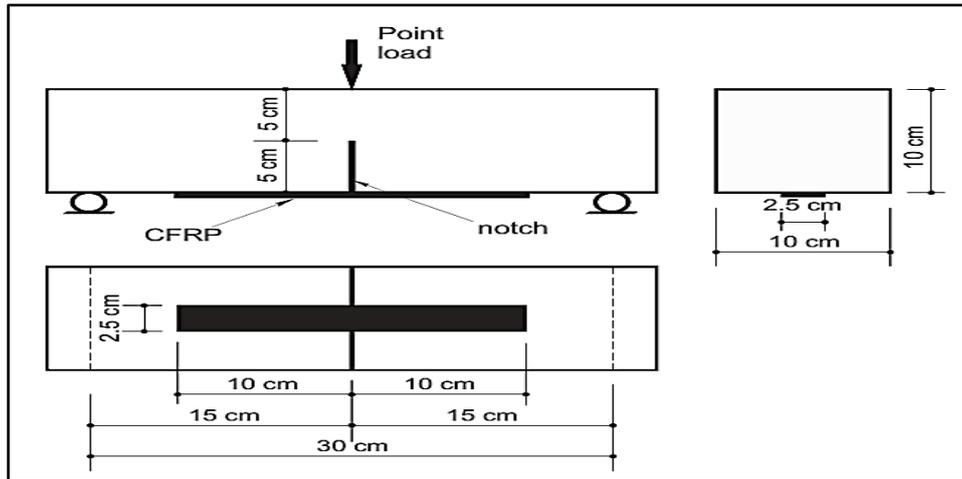


Figure I.45 Schéma d'un spécimen de poutre en béton renforcé par des CFRP [64]

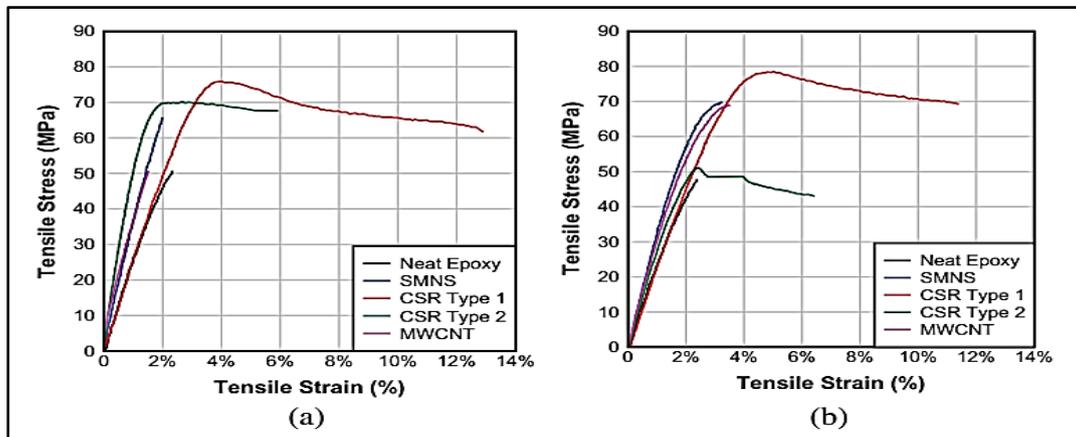


Figure I.46 Courbe typique contrainte de traction en fonction de déformation des échantillons (a) condition de contrôle ; b) protocole de conditionnement accéléré [64]

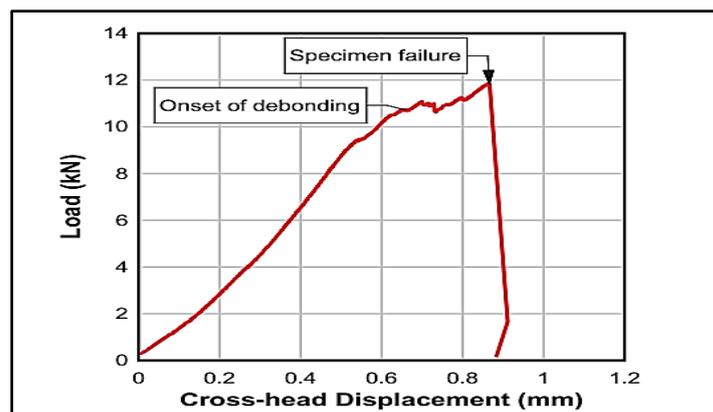


Figure I.47 Charge en fonction du déplacement pour un essai typique [64]

### c. Autres essais

#### i. Oxyde de graphène (GO)

Les performances mécaniques des résines imprégnées avec de l'Oxyde de Graphène sont largement étudiés par divers chercheurs, comme Bao et al. en 2011 [69], Bindi Charmila et al. en 2014 [70], Baruah P. & Karak N. en 2016 [71], ainsi que Larsen RM and al. [72]. Les résultats de ces travaux ont révélé une amélioration considérable de la ténacité (263 %), de la résistance à la traction (161 %) et de l'allongement à la rupture (159 %) après l'incorporation de 0,5 % en poids de GO dans un époxy hyperbranché (HBE) (Fig. I.48). Ceci est dû à :

- Le thermodurcissable HBE est une structure de réseau tridimensionnelle, qui permet au GO d'obtenir suffisamment d'espaces pour interagir avec les segments de la chaîne de différentes manières. Ces arrangements ont permis à la matrice d'augmenter l'élongation grâce à un impact positif sur la mobilité des segments et à une augmentation de la contrainte de traction avec l'incorporation de GO.
- Dans la zone de contrainte plus élevée, les feuilles de GO bien empilées aux interfaces peuvent se déplacer dans l'alignement de la direction de la contrainte appliquée, prolongeant ainsi l'élongation. Ce phénomène a accéléré la distribution de la contrainte dans la direction de la charge. Entraînant une amélioration de la performance mécanique.

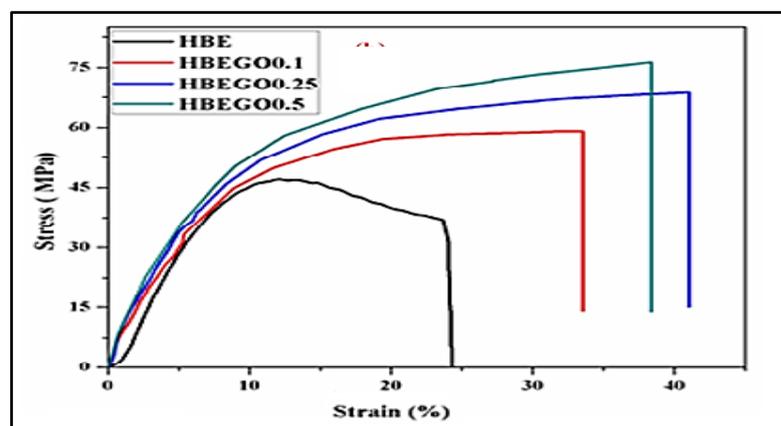


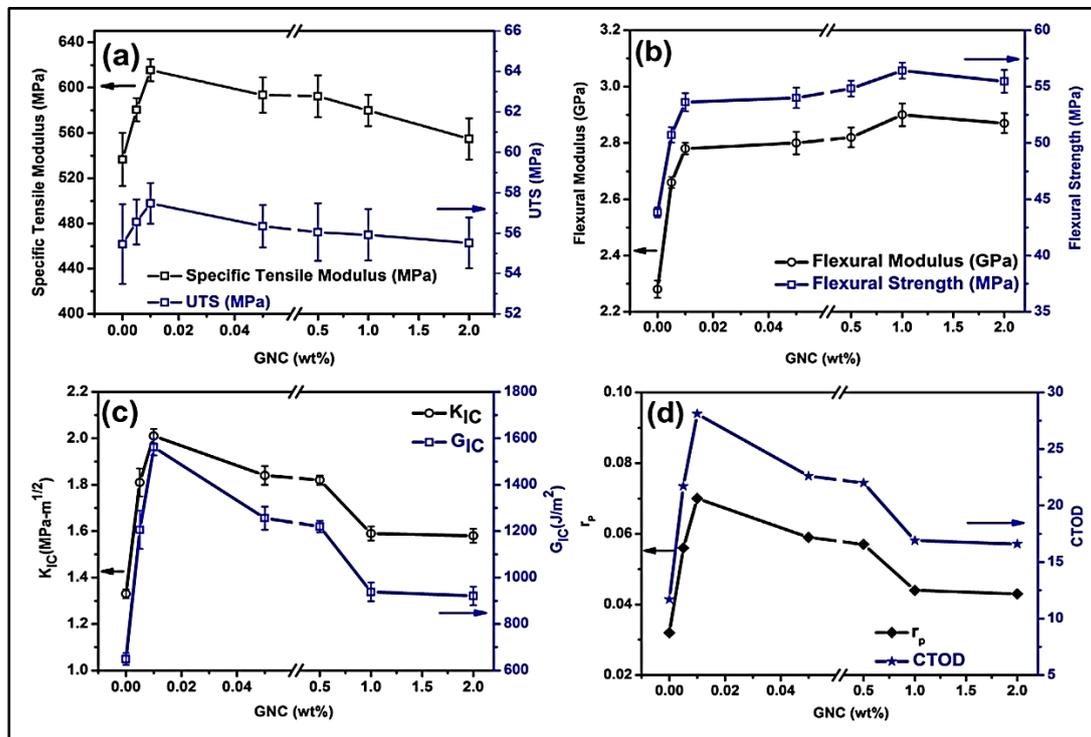
Figure I.48 Profils de contrainte-déformation des différents thermodurcissables [69]

#### ii. Nano-plaquettes de graphène GNP et nano-feuilles de graphène GNS

En comparaison avec l'époxy pur, il a été constaté que l'inclusion de GNP et GNS pouvait également améliorer les propriétés mécaniques des composites époxy [73-76]. Par exemple, l'effet de l'ajout de 0,005 % en poids à 2 % en poids de feuilles de nano-carbone de type graphène (GNC) aux résines époxy sur leurs propriétés mécaniques a été largement étudié et les résultats ont montré que la résistance à la traction et le module de traction spécifique (module d'élasticité divisé par la densité) ont augmenté d'environ 2 % à 4 % et 8 % à 15 %, respectivement, par rapport à l'échantillon pur. Fait intéressant, les propriétés de traction ont montré la meilleure amélioration au chargement de 0,01 % en poids de GNC. Ces améliorations seraient dues à la dispersion homogène des nano-charges dans la matrice, évitant la formation d'agglomérats. Fait intéressant, les propriétés de traction ont montré la meilleure amélioration au chargement de 0,01 % en poids de GNC.

Ces améliorations seraient dues à la dispersion uniforme des nanocharges dans la matrice, empêchant la formation de d'agglomérations. De plus, les GNC sont efficacement améliorés en

raison de la bonne interaction chimique entre les groupes fonctionnels des GNC et la matrice. De plus, la grande surface des nano-feuilles, en raison de leur rapport d'aspect élevé, offre une énorme surface d'interaction avec la matrice, permettant un transfert efficace des contraintes de la matrice à la charge. L'imprégnation des nanoparticules améliore également les propriétés de flexion. Lors de l'ajout de 0,005, 0,01 et 1 % en poids de GNC à la matrice époxy, la résistance à la flexion a augmenté de 16 %, 22 % et 23 %, respectivement (Fig. I.49).



Figures I.49 Propriétés mécaniques de l'époxy et des nanocomposites à différents % en poids de GNC.

Guadagno et al. [77] ont incorporé 0,5, 1 et 4 % en poids de GNP dans un adhésif époxy pour préparer les joints bout à bout. Des colles époxy non chargées et chargées en GNP ont été utilisées. Il a été observé qu'avec une augmentation de la fraction pondérale des GNP jusqu'à 1%, la résistance des joints adhésifs était accrue. Cependant, avec la fraction pondérale plus élevée de 4% du GNP/époxy, les joints adhésifs ont montré une résistance de joint considérablement inférieure par rapport aux joints avec adhésif comprenant 0,5% en poids et 1% en poids de GNP (Fig. I.50). En outre, Jojibabu et al. [67] ont reportés des différentes fractions de poids de l'incorporation du GNP sur la résistance au cisaillement à simple recouvrement des joints époxy. Les résultats ont indiqué que l'addition des GNPs augmentait de manière significative la résistance au cisaillement des joints. La résistance maximale au cisaillement par recouvrement a été obtenue pour les joints PNB/époxy à 0,5 % en poids, soit 48 % de plus que celle des joints époxy purs (Fig. I.51).

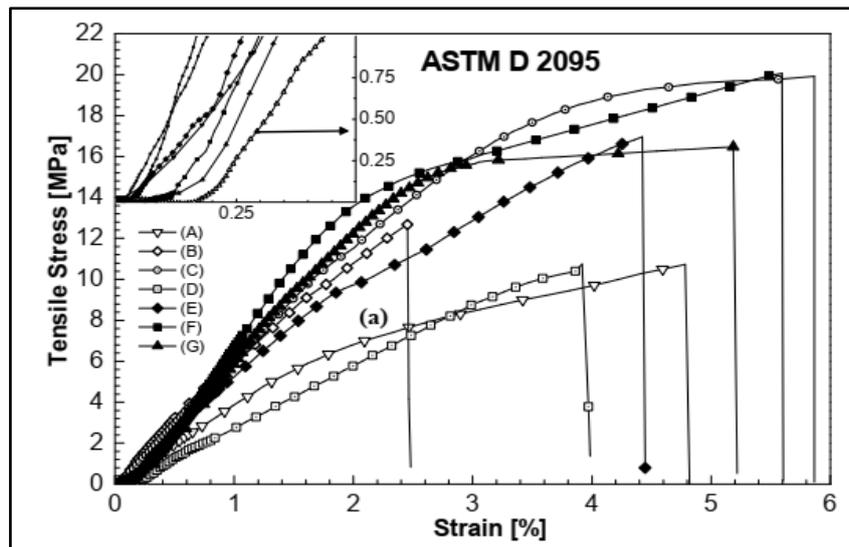


Figure I.50 contrainte-déformation des joints collés dans les essais de traction ASTM D 2095 [77]

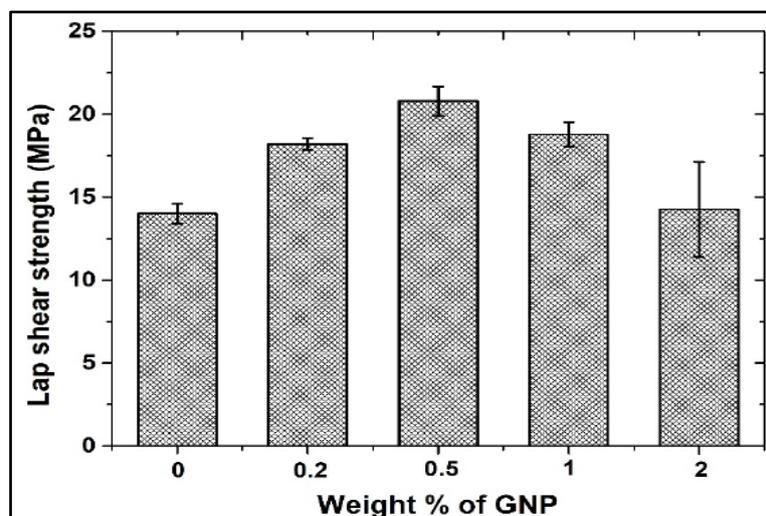


Figure I.51 Résistance au cisaillement sur un seul recouvrement des différentes fractions de poids des joints collés GNP/époxy [67]

### I.5.2.2 Combinaison de plusieurs nanocharges

La combinaison de deux types de nanocharges pour l'amélioration des propriétés des résines époxy a montré son efficacité, selon de nombreuses recherches [78 - 83]. En effet, Hosur et al. [78], ont étudiés MWCNTs fonctionnalisés par un carboxyle (COOH-MWCNT) et des nanoclays de montmorillonite (MMT) dans de l'époxy, à des charges de 0,1 % en poids de COOH-MWCNT/2 % en poids de MMT. La résistance à la flexion, module de flexion et la déformation ont été améliorés de 29 %, 44 % et 1 %, respectivement, par rapport aux échantillons de contrôle. L'augmentation des propriétés a été attribuée à l'effet synergique des MWCNT et de la nano-argile qui interagissent chimiquement entre eux et avec la résine époxy et qui arrêtent et retardent la croissance des fissures, une fois qu'elles sont apparues (Fig. I.52).

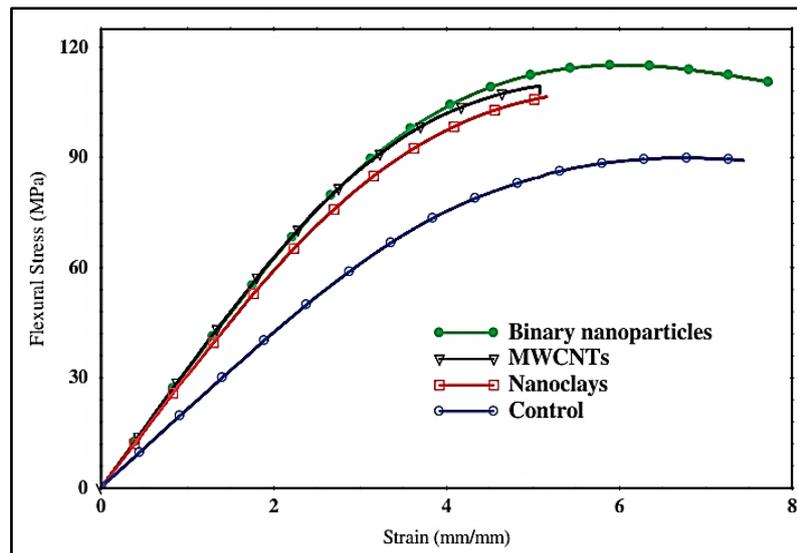


Figure I.52 Contrainte de flexion en fonction de la déformation d'échantillons nano composites témoins et renforcés par des nano particules [79]

### I.5.3 L'utilisation des résines époxy modifiés par nanomatériaux pour le renforcement

Pour le renforcement des éléments en béton armé renforcés ou réparés par CFRP, il faut tout d'abord faire une bonne compréhension du comportement des fibres de carbone/résines époxy avec les nanomatériaux a été établie. Cependant, il existe peu d'études sur l'effet des liants modifiés par des nanomatériaux sur l'efficacité du processus de réparation et de renforcement des composants en béton. Il convient de noter que peu d'études ont examiné l'effet des résines époxy nano-modifiées sur le comportement des éléments de joint FRP/béton [64, 84, 85]. En effet, Irshidat et Al-Sale [85], ont étudiés l'effet des époxy modifiés par CNT's sur l'adhérence entre le béton et les lamelles de CFRP et GFRP, où une série de prismes en béton renforcés par FRP sont testés sous un essai de double cisaillement. Les résultats expérimentaux ont montré que l'utilisation d'une résine époxy modifiée par des CNT's améliore la force d'adhérence et le glissement à la rupture des spécimens testés de 35% et 52% dans le cas de la fibre de carbone et de 26% et 83% dans le cas de la fibre de verre, respectivement (Fig. I.53).

Le principal mode de rupture pour les spécimens à base d'époxy pur était le décollement à l'interface entre la lamelle de fibre et la surface du béton (support), comme le montre la Fig. I.41 (a-c), tandis que l'utilisation de l'époxy modifiée par des CNT a conduit à une rupture cohésive, (Fig. I.53 (d-f))

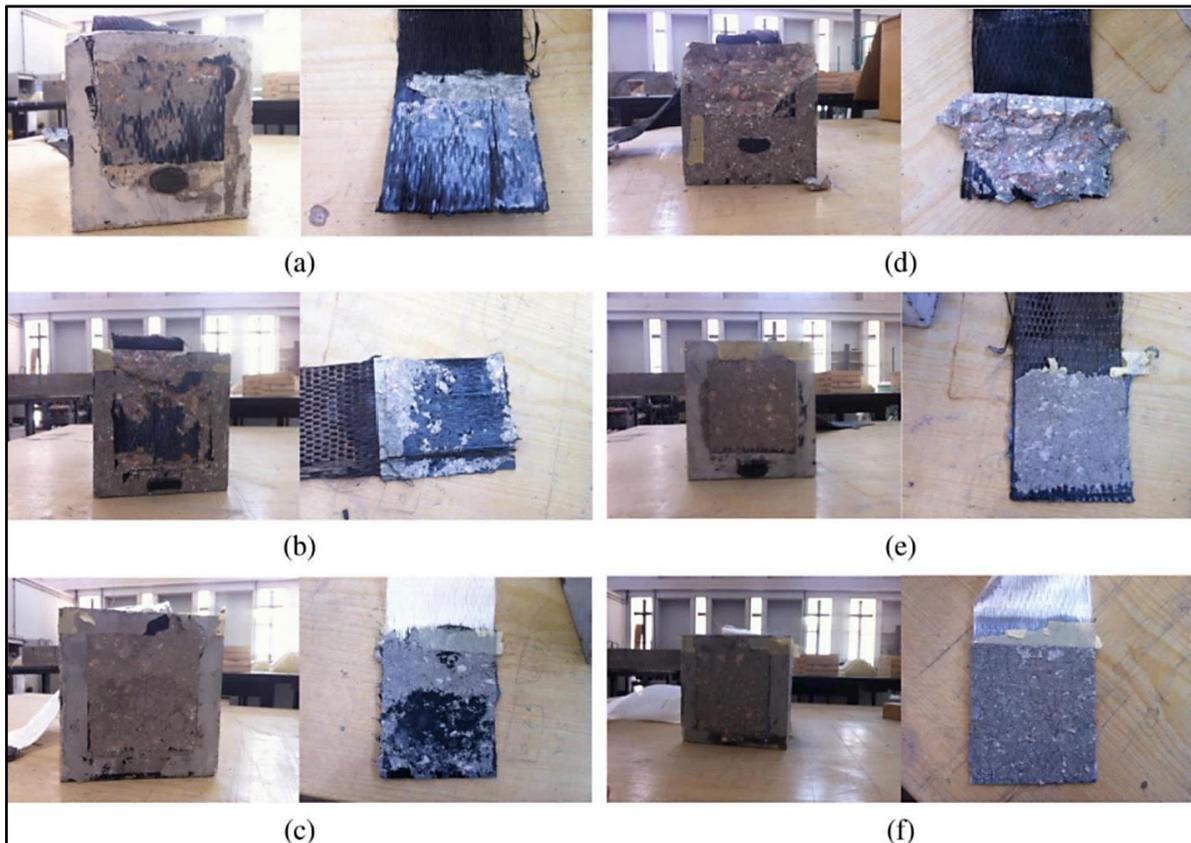


Figure I.53 Les différents modes de rupture des échantillons testés [84].

Dans une autre campagne d'investigation, Irshidat et al. [86] ont étudiés l'influence de l'ajout des CNT's a la résine sur les charges ultimes, la rigidité initiale (pente de la partie linéaire initiale de la courbe charge-déflexion) et la ténacité (aire sous la courbe). Les essais de flexion quatre points sont réalisés sur des poutres en BA de dimensions  $100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 1555 \text{ mm}$  avec un ferrailage identique représenté dans la figure suivante :

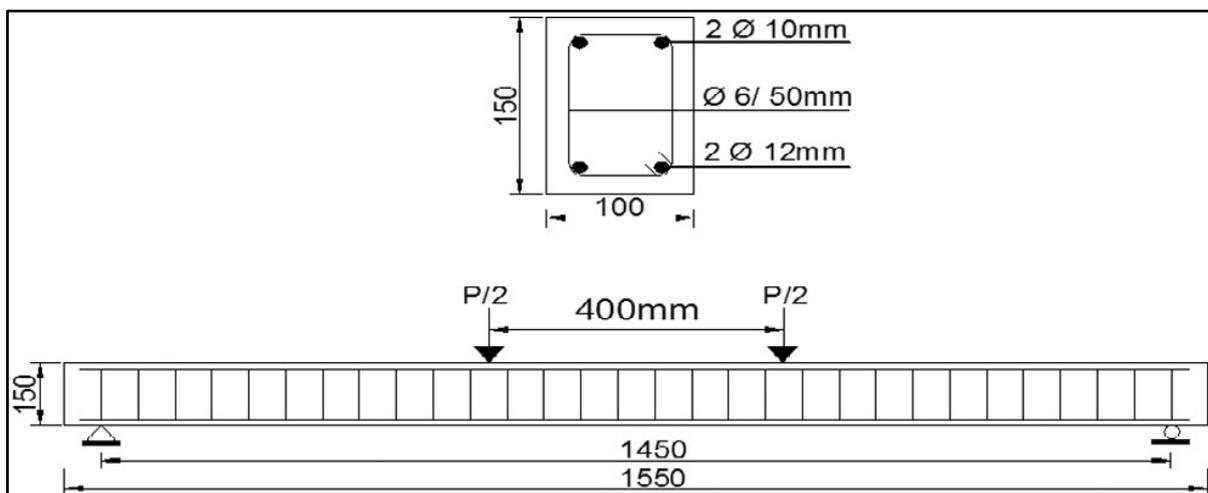


Figure I.54 Dimensions et détails des armatures des spécimens d'essai [86].

Les résultats des essais ont montré que l'utilisation d'époxy modifié par des CNT améliorait légèrement la charge ultime des poutres de 5%, mais augmentait significativement leur rigidité et leur ténacité de 35% et 28%, respectivement, par rapport aux spécimens en époxy pur. Ces améliorations ont été attribuées à la capacité des CNT à empêcher efficacement la formation et la propagation de microfissures à l'interphase entre la fibre de carbone et la matrice époxy, en améliorant l'adhésion fibre de carbone/résine époxy et béton/résine époxy, ce qui conduit à un transfert de charge approprié entre la matrice et le béton, et à la capacité des CNT à limiter les microfissures de la matrice, ce qui augmente l'absorption d'énergie de l'ensemble du système avant le décollement ou la rupture de la feuille, d'où une meilleure résistance, ce qui améliore la ténacité (Fig. I.55).

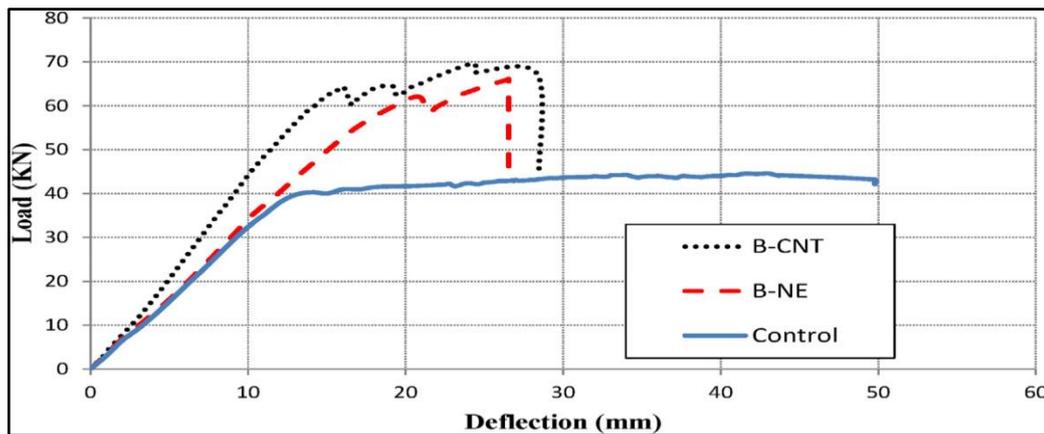


Figure I.55 Réponse charge-déflexion des spécimens témoins, époxy pure et époxy renforcée [86].

Afin de mieux simuler l'effet des CNT's sur le comportement des composites utilisés pour le renforcement des éléments en BA, d'autres chercheurs ont étudiés expérimentalement et numériquement l'effet des CNT sur le comportement en flexion de poutres en béton armé renforcées par des feuilles de CFRP collées à l'extérieur. Un modèle non linéaire a été construit, validé, puis utilisé pour réaliser une étude paramétrique pour étudier l'effet de divers paramètres sur l'efficacité du renforcement des composites CFRP modifiés par des CNT. Les paramètres comprenaient la résistance du béton, le ratio de renforcement de la flexion, la longueur, la largeur et la configuration des composites CFRP modifiés par des CNT [87].

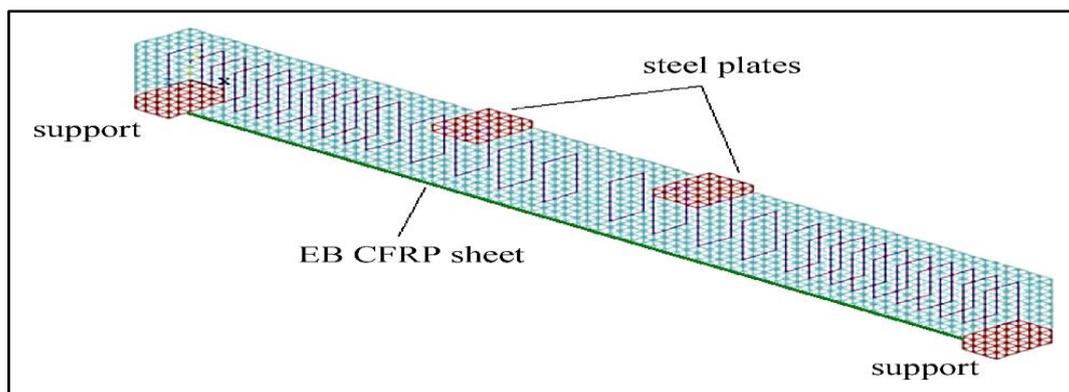


Figure I.56 Modèle typique par MEF d'une poutre en béton Armé renforcé [87].

Le travail effectué dans cette campagne a permis d'aboutir à des résultats très positifs tels que : l'incorporation des CNT's, qui a amélioré le comportement des composites collés au béton en retardant l'initiation des fissures et améliorant la résistance à la flexion des poutres. Le modèle par la MEF a permis de prédire le comportement en flexion des poutres avec précision raisonnable. Enfin la longueur et la largeur des lamelles améliorées par CNT's influence fortement sur le comportement des poutres vis-à-vis à la flexion [87].

## **I.6 Conclusion**

A partir de notre synthèse bibliographique, on a pu voir avec la genèse de nombreuses recherches, que l'emploi des matériaux composites dans la réparation ou le renforcement des structures est devenu une pratique courante dans le domaine du génie civil pour son efficacité prouvée et avantages multiples. Les fibres de carbone, d'aramide ou de verre sont les plus couramment utilisés pour la préparation des composites à base de polymères, or que pour le domaine de la construction, les composites à base de fibres de carbone constituent la part du lion pour leurs caractéristiques mécaniques plus appropriées à ce domaine. Malgré la résistance à la traction et le module de Young élevés de ces composites, le problème de délaminage persiste en raison des faibles caractéristiques mécaniques des résines utilisées pour le collage de ces composites en comparaison avec celles des composites et du support, ce qui rend la résine le maillon faible des matériaux composites à base de polymères pour la réparation et/ou renforcement des structures en béton armé.

La littérature actuelle est riche de travaux durant la dernière décennie visant l'amélioration des caractéristiques mécaniques et thermiques des résines époxy en incorporant des différents nanomatériaux tels que les nano particules, nano argiles, nano plaquettes et nano feuilles, mais plus couramment les nanotubes de carbone CNT's avec leurs différentes formes. Ces études ont bien montré l'efficacité, les caractéristiques mécaniques et thermiques améliorées de ces résines époxy améliorées en comparaison avec de l'époxy pure. Cela dit, l'investigation de l'effet d'utiliser ses résines hybrides dans le domaine de la construction et du génie civil reste très limitée.

C'est pour cela, et dans le but d'enrichir la bibliographie dans le domaine d'application des composites innovants pour le renforcement et la réparation des structures en béton armé, nous proposons l'étude de l'effet d'incorporation des différents pourcentages de MWCNT's dans la résine époxy utilisés avec des composites pour le renforcement et la réparation des poutres en BA, soit au laboratoire, soit in situ en prenant un cas d'étude réel d'un pont ancien. Un travail poussé par la méthode des éléments finis fera l'objet afin de caler les résultats expérimentaux trouvés.

**CHAPITRE II :**  
**MATERIAUX, ESSAIS ET**  
**PROCEDURES**

## MATERIAUX, ESSAIS ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

### II.1 Introduction

Afin de suivre de près le comportement statique, sous chargement, des éprouvettes sous forme de poutres renforcées et/ ou réparées par matériaux composites à base de fibre de carbone (CFRP), avec insertion des nanotubes (CNTs) dans la résine (interface/adhésif), une campagne expérimentale, scindée en deux parties, a été menée en laboratoire. Les différents étapes et essais de cette campagne ont été réalisés au sein du Laboratoire Centrale des Travaux Publics/ LCTP (Antenne Blida) et au Laboratoire Géo-Matériaux et Génie Civil (LGMCG) de l'Université de Blida1. La charge maximale du bâti de flexion de la presse d'essai de flexion est limitée à 200 kN. Les poutres sont soumises à la flexion quatre (04) points et le renforcement a été effectué en utilisant les matériaux composites : unidirectionnel (tissu Sikawrap) et/ou lamelles stratifiés (Sika Carbodur) [88]. Nous proposons, donc, d'étudier en première partie le comportement des poutres renforcées avant rupture par composites améliorés avec différents pourcentages de nanotubes (CNT's) et la deuxième partie sera consacrée à l'évaluation du comportement des poutres réparées après endommagement avant utilisation des composites améliorés [89, 90].

### II.2 Programme Expérimental des poutres

Notre programme expérimental est scindé, temporairement, à un travail à court et un travail à long terme (Fig. II.1). Le travail à court terme, s'intéresse à l'identification et la caractérisation de tous les matériaux qui seront utilisés dans cette partie expérimentale à savoir (sable, graviers, eau, ciment, aciers HA et lisses, composites et poudres nanotubes). On procédera aux essais de caractérisation et essais d'adhérence.

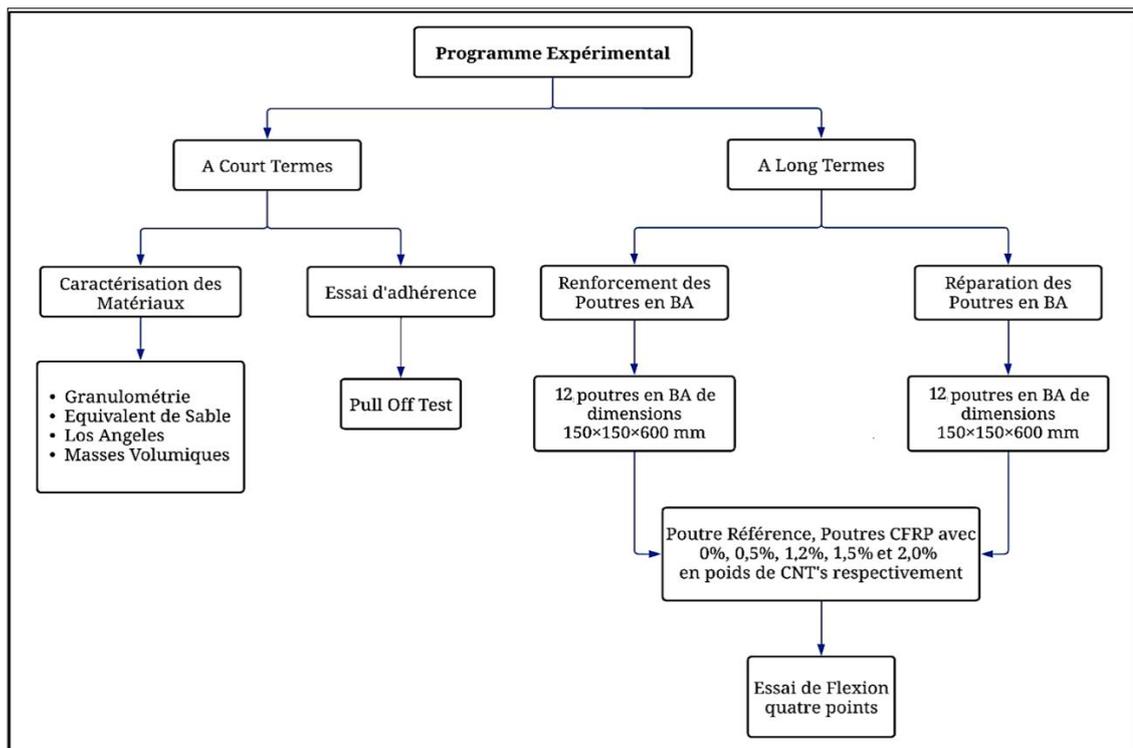


Figure II.1 Programme expérimental réalisé au laboratoire

Pour le travail à long terme, il s'agit du suivi des essais sous chargement en flexion 4 points, des poutres en béton armé renforcées par composites dont la résine est améliorée par les poudres nanotubes CNTs. Les deux phases de cette partie est le renforcement avant chargement et la réparation après fissuration et application des composites à divers pourcentages d'insertion des nanotubes CNTs. Un nombre total de 24 poutres, de dimensions  $(60 \times 15 \times 15)$  cm<sup>3</sup>, seront confectionnées pour cela. Les pourcentages en poids de la résine utilisés pour les poudres nanotubes CNTs sont de 0%, 0.5%, 1%, 1.5% et 2% [91].

## II.2.1 Caractérisation des Matériaux

### II.2.1.1 Le Béton

Pour préparer un béton homogène assurant une comparaison significative entre les différentes poutres, une analyse des différentes caractéristiques des matériaux entrants dans sa composition est nécessaire. Des éprouvettes cylindriques  $(16 \times 32)$  cm<sup>3</sup>, coulées de chaque gâché sont écrasées à 7 jours et 28 jours pour vérifier la résistance du béton. La méthode de composition théorique utilisée est celle de Dreux-Gorisse [92], pour un béton ordinaire. La composition finale retenue pour 1m<sup>3</sup> de béton est la suivante :

- Ciment :  $C = 350$  kg
- Sable Lavé 0-5 :  $S_1 = 345$  kg
- Sable correcteur :  $S_2 = 234$  kg
- Gravier 3-8 :  $G_{3-8} = 257$  kg
- Gravier 8-15 :  $G_{8-15} = 1046$  kg
- Eau de Gâchage :  $E = 219$  L

#### II.2.1.1.1 Les Granulats

Des granulats de la région de Sétif sont utilisés, il s'agit du gravier (8/15) et du gravillon (3/8) (Figs. II.2). L'analyse granulométrique sur des échantillons de 3000g et 1600g respectivement selon la norme NF EN 933-1 [93] est résumée dans les tableaux ci-après (Tab.II.1 et Tab.II.2) :



Figures II.2 (a) et (a) et (b) Gravier 8/15 (a) et Gravillon 3/8 (b) utilisés

Tableau II.1 Granulométrie du gravillon 3/8

Ouverture des tamis (mm)	Poids (grammes)		Pourcentage (%)	
	Refus partiel	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisats
10	0	0	0	100
8	7	7	0.4	99.6
6.3	183	190	11.9	88.1
5	394	584	36.5	63.5
4	577	1161	72.6	27.4
3.15	206	1367	85.4	14.6
2	88	1455	90.9	9.1
1	19	1474	92.1	7.9
0.315	12	1486	92.9	7.1
0.1	20	1506	94.1	5.9
0.08	6	1512	94.5	5.5
Fond de tamis	11	1523	95.2	4.81

Tableau II.2 Granulométrie du gravier 8/15

Ouverture des tamis (mm)	Poids (grammes)		Pourcentage (%)	
	Refus partiel	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisats
20	0	0	0	100
16	164	164	5.5	94.5
12.5	675	839	28	72
10	978	1817	60.6	39.4
8	731	2548	85	15
6.3	375	2923	97.4	2.6
5	46	2969	99	1
Fond de tamis	7	2976	99.2	0.8

Les autres caractéristiques des graviers utilisés tel que les masses volumiques absolues, apparentes selon la norme NF EN 1097-6 [94], tandis que le coefficient "Los Angeles LA" est selon la norme NF EN 1097-2 [95] sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.3 Autres caractéristiques des granulats

<b>Caractéristiques</b>	<b>Gravillon 3/8</b>	<b>Gravier 8/15</b>
Masse volumique Absolue (t/m <sup>3</sup> )	2.63	2.78
Masse Volumique Apparente (t/m <sup>3</sup> )	1.27	1.46
Coefficient LA	21.96	24.85

On peut déduire par ces différents résultats que la vraie classe du gravier (8/15) est : 5/16 et celle du gravillon (3/8) est : 0/8.

### **II.2.1.1.2 Le Sable**

Deux sables, soit un sable lavé de la région de Médéa et un sable fin correcteur de la région de 'Bah Bah' sont utilisés. Les résultats de la granulométrie de ses sables selon la norme NF EN 933-1 [96] sur des échantillons de 1000g de chaque sable sont représentés dans les tableaux suivants (Tab. II.4 et Tab. II.5) :

Tableau II.4 Granulométrie du sable lavé

<b>Ouverture des tamis (mm)</b>	<b>Poids (grammes)</b>		<b>Pourcentage (%)</b>	
	<b>Refus partiel</b>	<b>Refus cumulé</b>	<b>Refus cumulé</b>	<b>Tamisats</b>
5	20.2	20.2	2	98
4	54.8	75	7.5	92.5
3.15	128.7	203.7	20.4	79.6
2.5	110.6	314.3	31.4	68.6
2	84	398.3	39.8	60.2
1.25	158.2	556.5	55.6	44.4
1	58.4	614.9	61.5	38.5
0.63	124	738.9	73.9	26.1
0.315	147.1	886	88.6	11.4
0.16	83.8	969.8	97	3
0.08	28.7	998.5	99.8	0.2
Fond de tamis	9.7	1008.2	100.82	

Ainsi, on peut déduire que la vraie classe du sable lavé est : (0/5). Le module de finesse est calculé en divisant par 100 la somme des pourcentages de refus sur la série de tamis (0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm), soit :

$$M_f = \frac{96.98 + 88.60 + 73.89 + 55.65 + 31.43 + 2.02}{100} = 3.49 \quad \dots\dots\dots (1)$$

Ce sable, étant trop grossier pour assurer une bonne dispersion dans le béton, nécessite une correction par ajout d'un autre sable fin.

Tableau II.5 Granulométrie du sable correcteur

Ouverture des tamis (mm)	Poids (grammes)		Pourcentage (%)	
	Refus partiel	Refus cumulé	Refus cumulé	Tamisats
5	0	0	0	100
4	0	0	0	100
3.15	0	0	0	100
2.5	0	0	0	100
2	0	0	0	100
1.25	1	1	0.1	99.9
1	2	3	0.3	99.7
0.63	20.3	23.3	2.3	97.7
0.315	228	251.3	25.1	74.9
0.16	570.6	821.9	82.2	17.8
0.08	153.7	975.6	97.6	2.4
Fond de tamis	24	999.6	99.9	0.1



Figures II.3 OSables utilisés : Lavé (a) et correcteur (b)

Le module de finesse de ce sable est :

$$M_f = \frac{82.19 + 25.14 + 2.34 + 0.1}{100} = \mathbf{1.10} \quad \dots\dots\dots (2)$$

En utilisant la règle d'Abram afin d'avoir un module de finesse optimal  $M_{Fopt} = 2,5$ , on peut déduire les quantités nécessaires de chaque type de sable.

- Sable Lavé 0/5 (S1)  $M_{F1} = 3.49$  (sable grossier).
- Sable de Bah Bah (S2)  $M_{F2} = 1.10$  (sable fin).

$$\text{Proportion du sable S1} = \frac{M_{fopt} - M_{f2}}{M_{f1} - M_{f2}}$$

$$\text{Proportion du sable S2} = \frac{M_{f1} - M_{fopt}}{M_{f1} - M_{f2}}$$

Soit :

$$S1 = \frac{2.50 - 1.10}{3.49 - 1.10} = \mathbf{0.59} \quad S2 = \frac{3.49 - 2.50}{3.49 - 1.10} = \mathbf{0.41} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Donc on prendra 59% du sable (0/5) et 41% du sable correcteur. Ainsi la granulométrie du sable rectifié deviendra (Tab. II.6).

Tableau II.6 Granulométrie du sable rectifié choisi

Ouverture des tamis (mm)	Refus cumulés (%) : sable 0/5	Refus cumulés (%) : sable correcteur	Refus cumulés (%) : 0.59% sable0/5+0.41% sable correcteur	Tamisats cumulés (%)
5	2	0	1.2	98.8
4	7.5	0	4.4	95.6
3.15	20.4	0	12	88
2.5	31.4	0	18.5	81.54
2	39.8	0	23.5	76.5
1.25	55.6	0.1	32.8	67.2
1	61.5	0.3	36.4	63.6
0.63	73.9	2.3	44.5	55.5
0.315	88.6	25.1	62.6	37.4
0.16	97	82.2	90.9	9.1

0.08	99.8	97.6	98.9	1.1
Fond de tamis	100.82	99.9	100.4	

Les résultats des essais de l'Equivalent de Sable (ES) selon la norme NF EN 933-8 + A1 [97] et les masses volumiques absolues, apparentes selon la norme NF EN 1097-6 [98] sont regroupés dans le tableau suivant :

Tab. II.7 Autres caractéristiques des sables

Caractéristiques	Sable Lavé	Sable Correcteur
Equivalent de Sable (ES)	50.88	64.19
Masse volumique Absolue (t/m <sup>3</sup> )	2.62	2.56
Masse Volumique Apparente (t/m <sup>3</sup> )	1.54	1.46

### II.2.1.1.3 Le Ciment

Le ciment utilisé dans toutes les confections des éprouvettes (poutres) est de classe CEM II A 42.5 commercialisé par la société « Lafarge » sous le nom 'Matine'. Il s'agit d'un ciment de couleur grise destiné pour béton de haute performance, utilisé comme liant hydraulique [99].

### II.2.1.1.4 Eau

L'Eau du robinet est utilisée pour la formulation du béton destiné pour la préparation des poutres d'essai sans aucun ajout d'adjuvant.

### II.2.1.1.5 Composition du béton

La composition du béton ordinaire utilisé pour la préparation des poutres d'essai est calculée selon la méthode graphique de DREUX-GAURISSE [100] qui est choisie pour sa rapidité et simplicité. La composition finale adoptée sera en fonction des essais d'affaissement sur béton frais et de compression sur béton durci.

#### A. Détermination du Rapport C/E

L'objectif est de formuler un béton ordinaire avec une résistance moyenne en compression de 25 MPa, le rapport C/E est tiré de l'équation suivante :

$$f_{cm} = G \times \sigma_{c28} \times \left( \frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

Avec :

$f_{cm}$  : la résistance moyenne en compression à 28 jours [MPa].

$\sigma_{c28}$  : la classe vraie du ciment à 28 jours [MPa].

C : le dosage en ciment [Kg/m<sup>3</sup>].

E : le dosage en eau totale sur matériaux secs [Kg/m<sup>3</sup>].

G : le coefficient granulaire.

$$f_{cm} = f_{c28} + 15\%$$

Le Béton ordinaire que l'on cherche à formuler a une résistance visée à 28 jours de 25 MPa, donc :

$$f_{cm} = 25 + 15\% = 28.75 \text{ MPa} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Le ciment disponible est CEM II 42,5 (classe de résistance commerciale), ainsi La classe vraie du ciment à 28 jours est estimée à :

$$\sigma_{c28} = 55 \text{ MPa}$$

La granularité des graviers permet l'estimation du coefficient granulaire G avec :

$$D_{max} = 16 \text{ mm}$$

Tableau II.1 Coefficient Granulaire G, Méthode Dreux-Gorisse

Qualité des granulats	Granulats fins ( $D_{max} < 16\text{mm}$ )	Granulats moyens ( $25 < D_{max} < 40\text{mm}$ )	Gros granulats ( $D_{max} > 63\text{mm}$ )
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,55	0,60
Passable	0,35	0,40	0,45

On a :  $G = 0.45$ .

Ainsi, le rapport pondéral C/E calculé de l'équation précédente est :

$$\frac{C}{E} = \left( \frac{f_{cm}}{\sigma_{c28} \times G} + 0.5 \right) = \left( \frac{28.75}{55 \times 0.45} + 0.5 \right) = 1.66 \quad \dots\dots\dots (6)$$

## B. Évaluation de la quantité de ciment C et de la quantité d'eau E

Pour un dosage en ciment choisi, avec la valeur de C = 350 Kg/m<sup>3</sup> et en utilisant l'Abaque de Dreux, qui permet l'évaluation de la quantité d'eau (E) et de l'Affaissement (A), on obtient (Fig. II.4) :

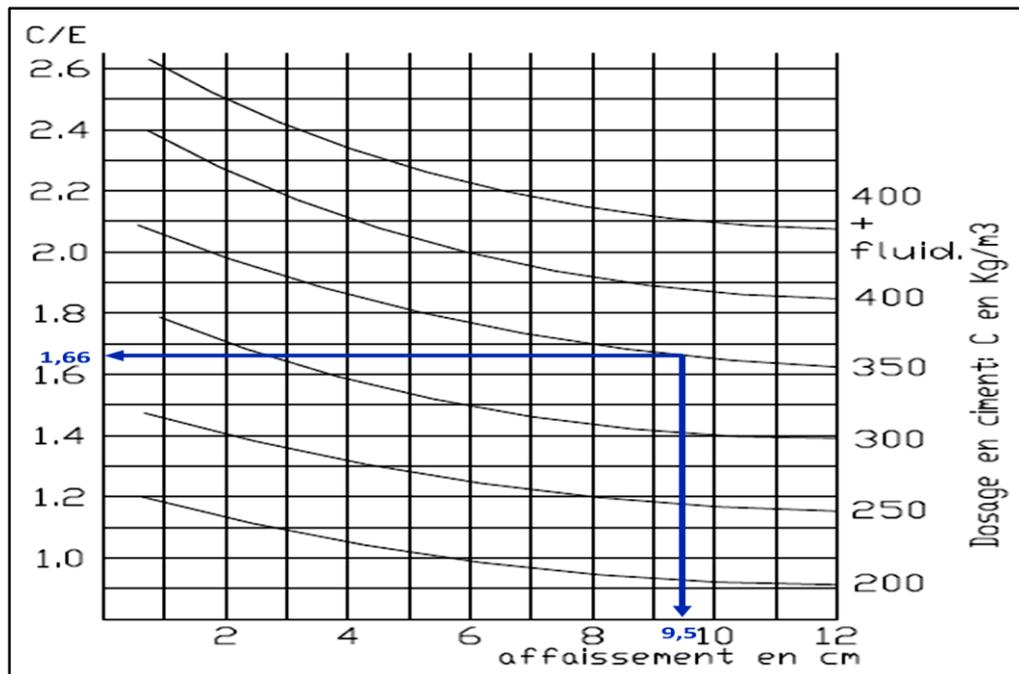


Figure II.4 Abaque pour l'estimation de la quantité de ciment et d'Eau

D'après l'abaque, et pour un dosage en ciment de 350 kg/m<sup>3</sup> et un rapport C/E de 1.66, l'affaissement théorique est de 9.5 cm soit un béton de classe S2 selon la norme NF EN 206/CN [101] (Tab. II.9 et II.10).

Tableau II.9 Evaluation de l'ouvrabilité par référence à l'affaissement au cône

Plasticité	Serrage	Affaissement [cm]	Dénomination NF-EN 206/CN
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	S1
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	S1 / S2
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	S2
Béton mou	Piquage	10 à 13	S3
Béton liquide	Léger piquage	≥ 14	S3 / S4 / S5

Tableau II.10 Dénomination des affaissements selon la Norme EN 206-1 en mm.

S1	S2	S3	S4	S5
De 10 à 40	De 50 à 90	De 100 à 150	De 160 à 210	≥ 220

Donc la Quantité d'eau nécessaire est :  $E = \frac{C}{1.66} = \frac{350}{1.66} = 210.84 \text{ L/m}^3$  ..... (7)

- La correction de la quantité d'eau :

Dmax = 16 mm ; d'après le tableau suivant, la correction à apporter est de +4% sur le dosage en eau E soit : 210.84 x 1.04 = 219.28 L.m<sup>-3</sup>.

Tableau II.11 Correction en pourcentage d'eau en fonction de la dimension des plus gros granulats  $D_{max}$  (correction si  $D_{max} \neq 25$  mm).

Dimension maximale des plus gros granulats $D_{max}$ [mm]	5	10	16	25	40	63	100
Correction sur le dosage en eau $E$ [%]	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

### C. Traçage de la courbe granulaire de référence

L'objectif du traçage c'est de déterminer les quantités des différents granulats nécessaires pour le dosage du béton. Pour le faire, on trace le graphique d'analyse granulométrique type AFNOR, dans lequel nous traçons la courbe de référence O A B, ou les coordonnées des points O, A et B sont :

Tableau II.12 Valeurs des coordonnées pour la courbe de référence (OAB)

Courbe de référence (OAB)	
<b>O</b>	<b>(0, 0)</b>
<b>A</b>	<b>(<math>X_a, Y_a</math>)</b>
	$X_a = D_{max}/2 = 16/2 = 8$
	$Y_a = 50 - \sqrt{1.25D_{max}} + K$ $= 50 - \sqrt{1.25 \times 20} + 2 = 47.53$
<b>B</b>	<b>(<math>D_{max}, 100\%</math>) = (16, 100%)</b>

Avec :

$K$  : le coefficient correcteur dépend du dosage en ciment, de l'efficacité du serrage, de la forme des granulats roulés ou concassés (le sable ayant une influence prépondérante) et du module de finesse du sable. Dans cette application, les granulats sont concassés, la puissance de la vibration est normale et le dosage en ciment  $C$  de 350.  $K$  est donc pris à +2.

Tableau II.13 Valeur du terme correcteur  $K$  en fonction du dosage en ciment, de la puissance de la vibration et de l'angularité des granulats.

Vibration	Faible		Normale		Puissante	
	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
400+Superplastifiant	-2	0	-4	-2	-6	-4
400	0	+2	-2	0	-4	-2
350	+2	+4	0	+2	-2	0
300	+4	+6	+2	+4	0	+2
250	+6	+7	+4	+6	+2	+4
200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

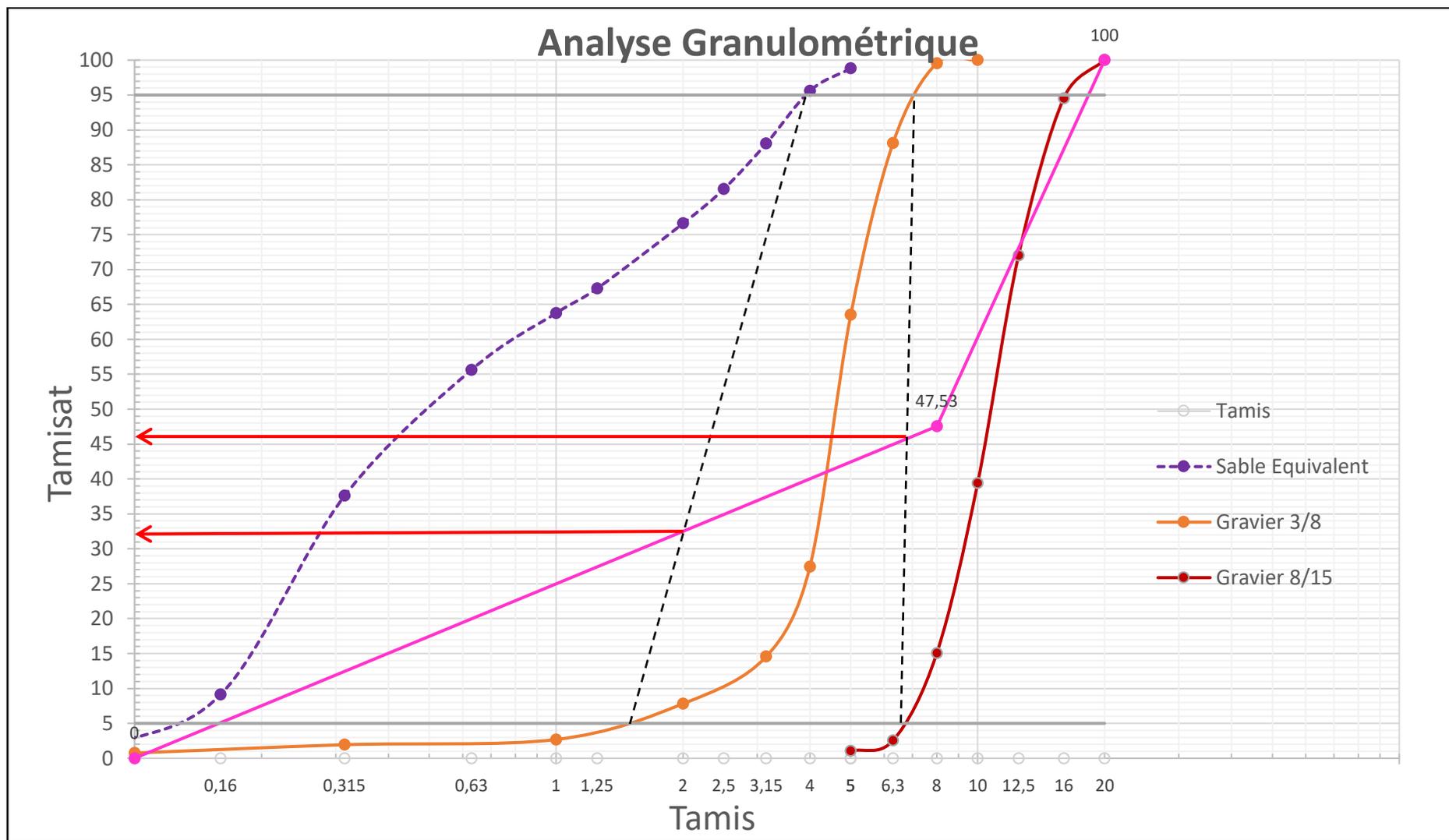


Figure II.5 Courbe Granulaire de référence

### D. Estimation du coefficient de compacité

Le coefficient de compacité  $\gamma$  estimé à l'aide du tableau suivant permet de déduire la quantité des différents autres composants de la formulation. La compacité  $\gamma$  est définie comme le rapport entre le volume de solide et le volume total du béton (Tab. II.14) :

$$\gamma = V_s/V_{\text{Béton}} \quad \dots\dots\dots (8)$$

Figure II.14 Valeur du coefficient de compacité  $\gamma$

Consistance	serrage	Coefficient de compacité $\gamma$						
		$D_{\text{max}}=5$	$D_{\text{max}}=10$	$D_{\text{max}}=12,5$	$D_{\text{max}}=20$	$D_{\text{max}}=31,5$	$D_{\text{max}}=50$	$D_{\text{max}}=80$
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,780	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter une correction :

Sable roulé et gravier concassé  $\rightarrow -0,01$  ;

Sable et gravier concassés  $\rightarrow -0,03$ .

Dans notre cas pour une consistance plastique et une vibration normale, le tableau donne les valeurs de  $\gamma$  pour les diamètres de granulats  $D_{\text{max}} = 12,5$  et  $D_{\text{max}} = 20$ , donc il y a lieu de faire une interpolation pour obtenir la valeur de  $\gamma$  pour le diamètre  $D = 16$ .

$$\gamma = \frac{(0,825 - 0,815)}{(20 - 12,5)} \times (16 - 12,5) + 0,815 = 0,820 \quad \dots\dots\dots (9)$$

Notre sable est un sable roulé de rivières et notre gravier est un gravier concassé, ainsi le coefficient de compacité est :

$$\gamma = 0,82 - 0,01 = 0,81$$

### E. Calcul des quantités des différents constituants du béton

Pour 1 m<sup>3</sup> de béton avec un coefficient de compacité  $\gamma = 0,81$  le volume des granulats est calculé comme suite :

$$\gamma_{th} = \frac{V_{\text{ciment}} + V_{\text{granulats}}}{V_{\text{Béton}}} = \frac{V_{\text{ciment}} + V_{\text{granulats}}}{1} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$V_{granulats} = \gamma_{th} - V_{ciment} = 0.81 - \frac{350 [kg]}{3100 [kg.m^{-3}]} \dots\dots\dots (11)$$

$$V_{granulats} = 0.697 m^3 = 697 L$$

Il est donc possible de calculer la quantité de chacun des constituants :

- Ciment :  $C = 350 kg.m^{-3}$
- Sable Lavé 0-5 :  $S_1 = 0.697 \times 0.59 \times 0.32 \times 2620 = 345 kg.m^{-3}$
- Sable correcteur :  $S_2 = 0.697 \times 0.41 \times 0.32 \times 2560 = 234 kg.m^{-3}$
- Gravier 3-8 :  $G_{3-8} = 0.697 \times 0.14 \times 2630 = 257 kg.m^{-3}$
- Gravier 8-15 :  $G_{8-15} = 0.697 \times 0.54 \times 2780 = 1046 kg.m^{-3}$
- Eau de Gâchage :  $E = 219 L.m^{-3}$

Ainsi masse volumique théorique du béton est :

$$\rho_{béton} = 350 + 219 + 345 + 234 + 257 + 1046 = 2451 kg.m^{-3}$$

### II.2.1.1.6 Confection des éprouvettes pour le control de qualité du béton

Afin de contrôler la qualité du béton formulé à partir de cette composition, des éprouvettes cylindriques de dimensions  $16 \times 32 cm^2$  sont confectionnées dont la composition du gâchée de 08 litres est :

- Ciment :..... 2.8 kg
- Sable Lavé:.....2.75 kg
- Sable Correcteur :..... 1.93 kg
- Gravier 3/8 :..... 2 kg
- Gravier 8/15 :..... 8.4 kg
- Eau potable :..... 1.75 litres

- Cône D'Abrahms ..... Affaissement : 11.5 cm
- Masse Volumique du Béton durci :  $2415 kg/m^3$
- Résultats d'écrasements
  - 7 jours : 17.8 MPa
  - 14 jours : 25.4 MPa
  - 28 jours : 29 MPa

Cette confection calculée par la méthode de DREUX-GORISSE est maintenue pour la préparation de toutes les poutres utilisées dans cette campagne expérimentale.

- Ciment :  $C = 350 kg.m^{-3}$
- Sable Lavé 0-5 :  $S_1 = 345 kg.m^{-3}$
- Sable correcteur :  $S_2 = 234 kg.m^{-3}$
- Gravier 3-8 :  $G_{3-8} = 257 kg.m^{-3}$
- Gravier 8-15 :  $G_{8-15} = 1046 kg.m^{-3}$
- Eau de Gâchage :  $E = 219 L.m^{-3}$

### II.2.1.2 Les Armatures

Les propriétés mécaniques des armatures HA utilisées sont les suivants :

- Limite d'élasticité :  $f_y = 550$  MPa
- Module d'Young :  $E_y = 200$  GPa
- Coefficient de Poisson  $\nu = 0.3$

### II.2.1.3 Les matériaux composites

Les matériaux composites utilisés dans ce programme expérimental sont principalement des lamelles en fibre de carbone commercialisés en Algérie par SIKA EL DJAZAIR [102] sous le nom de "SIKA CARBODUR" et la résine "SIKADUR 30 N", destinée pour le collage de ce système. Les nanotubes de carbone (CNTs) à parois multiples MWCNT's, sont importés de la Chine et commercialisés par "BEIJING BEIKE 2D MATERIALS CO., LTD". On a utilisé la résine "SIKADUR 52", destinée pour l'injection des fissures.

#### II.2.1.3.1 Lamelles de Fibre de Carbone SIKA CARBODUR

Les lamelles stratifiées "SIKA CARBODUR" est un polymère renforcé par fibres de carbone (CFRP), pultrudé à base de fibres de carbone, qui sont noyées dans une matrice époxydique. Selon sa notice d'achat du produit [103], il présente les caractéristiques suivantes (Fig. II.6) :

- Pourcentage volumique de fibres :  $> 68\%$  ;
- Densité :  $1.60$  g/cm<sup>3</sup> ;
- Conditionnement en rouleaux de 10, 25, 50 et 250 mètres ;
- Couleur : Noir ;
- Dimensions du type S 1012 :
  - Largeur ..... 100 mm
  - Epaisseur ... 1.2 mm
- Section ..... 120 mm<sup>2</sup> ;
- Module d'élasticité en traction  $> 170\,000$  MPa ;
- Résistance en traction  $> 3100$  MPa ;
- Allongement à la rupture  $> 1.80\%$ .

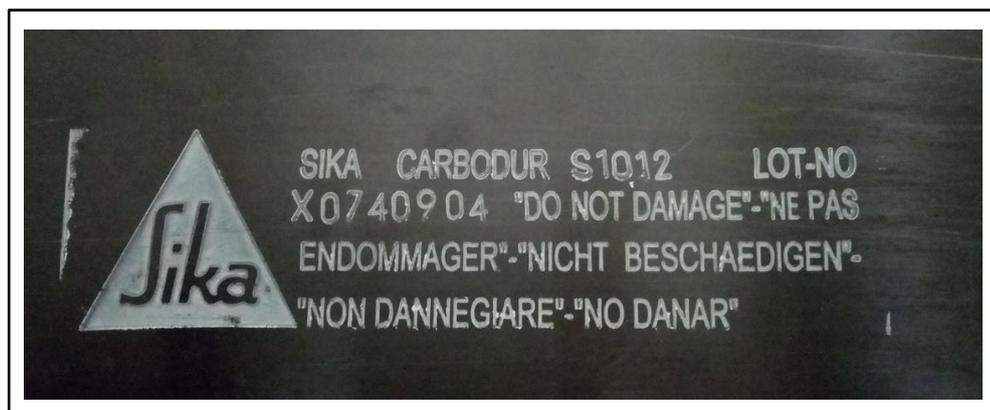


Figure II.6 Lamelles SIKA CARBODUR S1012

La colle utilisée avec ce procédé est SIKADUR 30, une colle époxydique a deux composants sans solvant (Fig. II.7) :

- Composant A : résine (couleur blanche).
- Composant B : durcisseur (couleur noire).

Cette colle est caractérisée par les caractéristiques suivantes [104] :

- Densité : 1,65 kg/l + 0,1 kg/l (Mélange A+B);
- Résistance à la compression : > 55 MPa à 2 jours et à +10°C ou >90 MPa à 2 jours et à +30°C ;
- Résistance à la flexion : > 30 MPa à 2 jours et à 20°C ;
- Module d'élasticité statique : 11 200 MPa ;
- Adhérence sur béton : > 4 MPa (rupture dans le support béton) ;
- Résistance à la traction par cisaillement : > 15 MPa à 3 jours et à +15°C;
- Coefficient de dilatation : 0.03 mm/m.°Cde - 10°C à + 40°C .
- 



Figure II.7 Bidon de colle Sikadur 30

### II.2.1.3.2 Nanotubes de carbone à parois multiples MWCNT's

Vue l'indisponibilité des poudres nanotubes de carbone (CNTs) en Algérie, et avec les difficultés de leur synthèse au niveau des laboratoires de recherche ou industriels, nous avons procédé à l'achat des nanotubes à utiliser, dans cette campagne expérimentale, de la Chine. La quantité importée est produite et commercialisée par la compagnie "BEIJING BEIKE 2D MATERIALS CO., LTD" [105, 106].

Ces nanotubes ont les caractéristiques suivantes (Figs. II. 8 et II.9) :

- Apparence : Poudre noire ;
- Pureté : >95 wt% ;
- Diamètre intérieur : 3-5 nm ;
- Diamètre extérieur : 8-15 nm ;
- Longueur : 3-12  $\mu\text{m}$  ;
- Surface active spécifique : >233  $\text{m}^2/\text{g}$  ;

- Densité :  $0.15 \text{ g/cm}^3$  ;
- Densité réelle :  $2.1 \text{ g/cm}^3$  ;
- Résistivité :  $1412 \mu\Omega\text{m}$  ;
- Méthode de préparation : Le dépôt chimique en phase Vapeur (CVD).



Figure II. 8 Nanotubes de Carbone à parois multiples (en poudres)

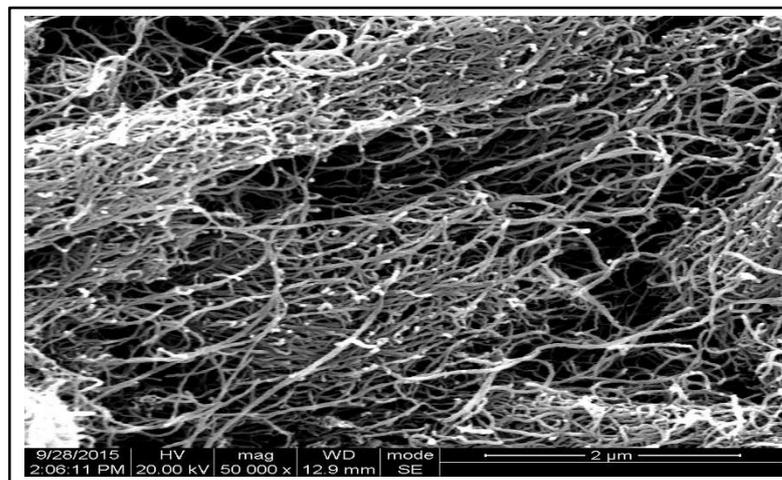


Figure 0. 9 Microscopie électronique à balayage (MEB) d'un échantillon de MWCNT's [105]]

Le module de Young observé pour des nanotubes a parois multiples avec des diamètres allant jusqu'à 7 nm peut atteindre 1000 GPa[97], tandis qu'une résistance à la traction de 11 à 63 GPa.

### II.2.1.3.3 Résine d'injection des fissures Sikadur 52

La résine "SIKADUR 52", destinée pour l'injection des fissures, est un produit d'injection à base de résine époxy deux composants a haute résistance sans solvant [107], il présente les caractéristiques suivantes (Fig. II.10):

- Composant A : résine (couleur Transparente).
- Composant B : durcisseur (couleur Maron).

- Densité : 1.1 kg/l + 1.0 kg/l (Mélange A+B : 1.1 kg/l) ;
- Résistance à la compression :  $>34\text{N/mm}^2$  à 7 jours et à  $+23^\circ\text{C}$  ;
- Résistance à la flexion :  $>41\text{N/mm}^2$  à 7 jours et à  $+23^\circ\text{C}$  ;
- Résistance à la traction :  $>24\text{N/mm}^2$  à 7 jours et à  $+23^\circ\text{C}$  ;
- Module d'élasticité en traction :  $1\ 100\ \text{N/mm}^2$  ;
- Adhérence par traction directe :  $> 4\ \text{N/mm}^2$  (rupture dans le support béton) ;
- Résistance à la traction par cisaillement :  $> 15\ \text{MPa}$  à 3 jours et à  $+15^\circ\text{C}$ .

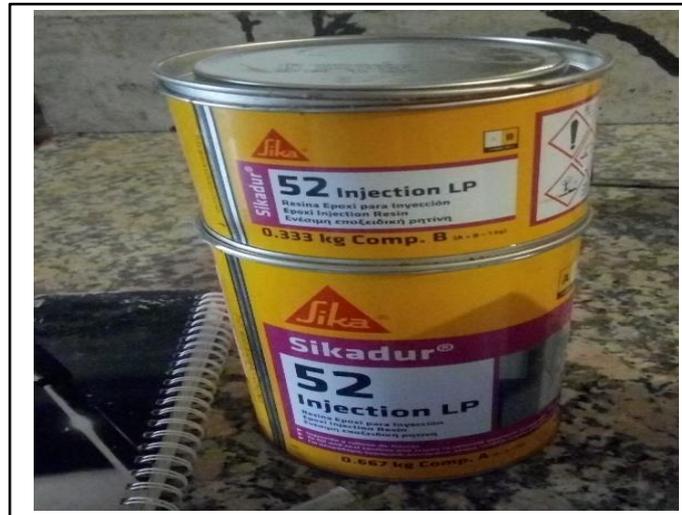


Figure II.10 Bidon de colle Sikadur52 LP

### II.2.2 Instrumentation et appareil de mesure

Les essais de flexion 04 points sur les éprouvettes d'essai sont réalisés au niveau du Laboratoire Centrale de Travaux Publics (LCTP)/Antenne de Blida, à l'aide d'une presse hydraulique entièrement automatisé de marque "MATEST", de capacité 200 kN et de dimensions maximales de 200x200x800 mm. L'intervalle de lecture pour cette presse est de 50 ms [108].



Figures II.11 et II.12. Vues de la Machine de flexion 04 points MATEST (200 kN)

Pour les essais destinés pour les cubes et les éprouvettes cylindriques, une machine de compression de marque ‘MATEST’, de capacité 3000 kN et de dimensions d'éprouvettes maximales jusqu'à 200 mm de côté pour les cubes et jusqu'au diamètre 160x320 mm pour les éprouvettes cylindriques (Figs. II.13 et II.14) [109].



Figures II.13 et II.14 Vues de la machine de compression ‘MATEST’ 3000 kN

Afin de mesurer les déplacements lors de l'essai de flexion, et vue l'absence de capteurs de déplacement intégré à la machine d'essai, on a conçu (propre initiative) un dispositif de mesure des déplacements linéaires lié à l'ordinateur à l'aide d'un microcontrôleur ‘ARDUINO UNO’ et un capteur de déplacement linéaire. ARDUINO UNO [110, 111], est une carte microcontrôleur basée sur l'ATMega328P. Elle possède 14 broches d'entrée/sortie numériques, 6 entrées analogiques, un résonateur céramique de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un connecteur ICSP et un bouton de réinitialisation. Il contient tout ce qui est nécessaire pour supporter le microcontrôleur, il suffit de le connecter à un ordinateur avec un câble USB ou de l'alimenter avec un adaptateur AC-to-DC ou une batterie pour commencer (Fig. II.15).

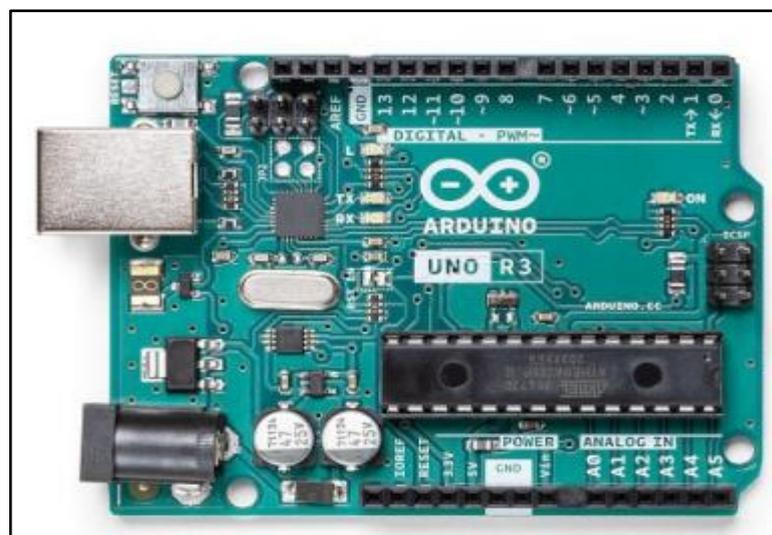


Figure II.15 Carte microcontrôleur ARDUINO UNO R3 [110]

Pour programmer la carte le microcontrôleur, on a utilisé l'Arduino IDE, qui est un environnement de développement intégré Open Source utilisé. La programmation de la carte ARDUINO UNO via un code C++ est pour faire ce que le programmeur souhaite.



Figure II.16 Vue de la fiche de l'environnement Arduino IDE [112]

Le capteur de déplacements linéaire utilisé est un modèle KTR 100 mm de marque *Accuracy*, avec une longueur de mesure 0-100 mm et une résistance électrique de  $5\text{ k}\Omega \pm 10\%$  (Fig. II.17).

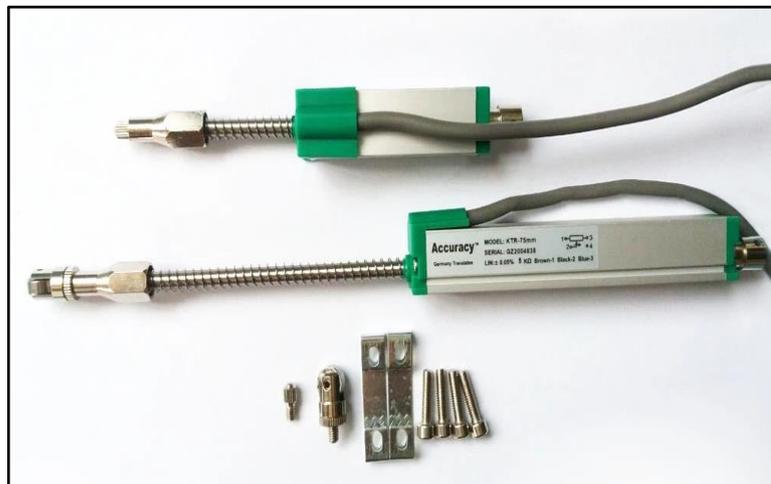


Figure II.17 Capteur de déplacement linéaire KTR 100

Les déplacements lus avec ce capteur seront affichés sur un afficheur LCD (16×2) et enregistrés en même temps sur un fichier Excel pour les exploiter ultérieurement, l'intervalle de lecture doit correspondre à celui de la machine d'essai de flexion (une lecture chaque 50 ms) et le lancement de la lecture s'effectuera à l'aide d'un bouton poussoir. Nous avons ajouté un capteur "DHT" pour mesurer la température et l'humidité durant l'essai. Un convertisseur analogique-numérique "ADS1015" avec précision de 12 bits à 3300 échantillons/seconde et amplification amplificateur de gain programmable, jusqu'à x16, pour aider à amplifier les petits signaux est augmenté par la suite la précision de lecture.

Le schéma de montage des capteurs, afficheur et bouton avec l'Arduino est représenté par la figure suivante (Fig.II.18).

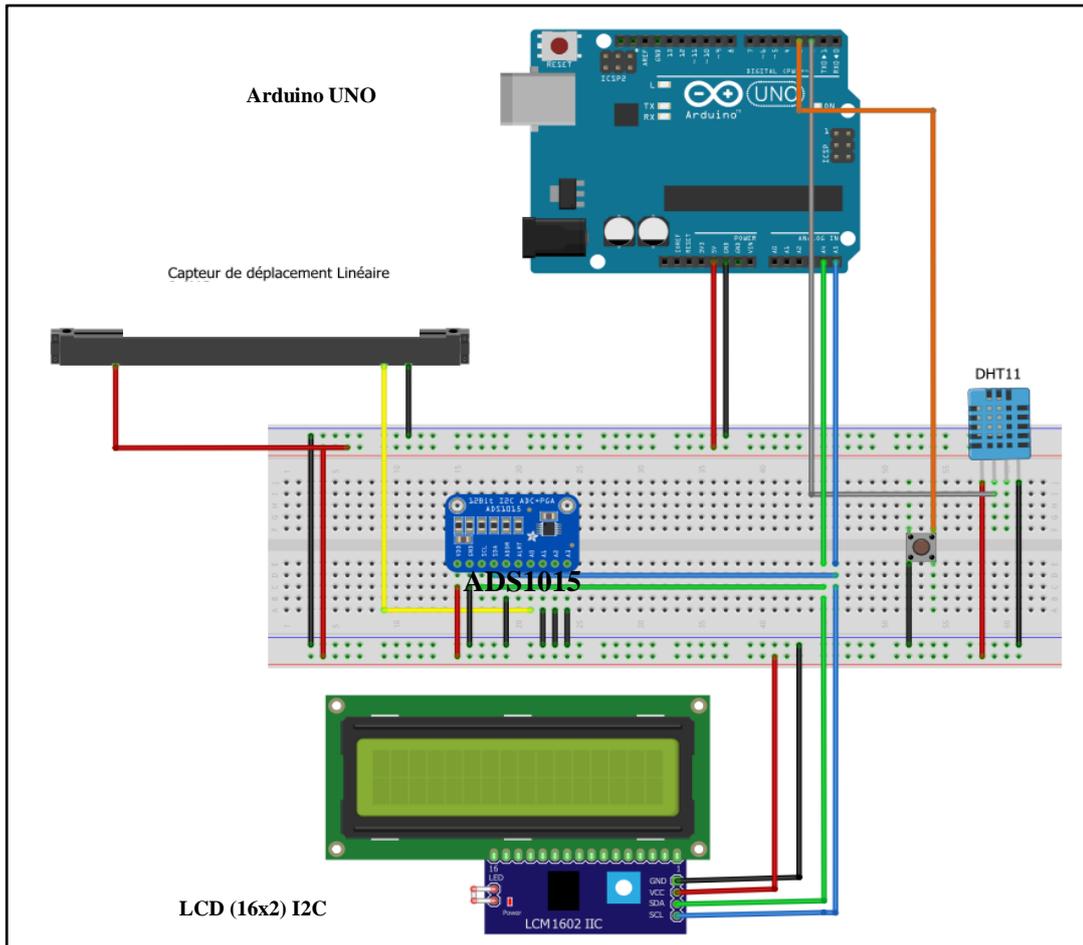


Figure II.18 Schéma de montage du système de mesure des déplacements

Le fonctionnement de ce système est assuré avec un code C++, qui sera chargé sur l'Arduino et qui permettra la coordination entre les différents capteurs et l'ordinateur (Voir programme sur Annexe).

## II.2.3 Préparation des spécimens d'essai

### II.2.3.1 Dimensionnement des éprouvettes d'essai

Les corps d'essai sont des poutres en béton armé de longueur 60 cm, de section 15 cm × 15 cm et de portée 45 cm. Le ferrailage utilisé pour le renforcement du béton est des armatures tendues en HA12 et comprimées en HA10 avec des cadres en acier doux 6 mm (Figs II.19 et II.20). On a pris les mêmes dimensions, les mêmes configurations des schémas statiques et les mêmes dosages du béton confectionné pour toutes les éprouvettes d'essai (renforcées et/ou réparées) par composites collés avec insertion des nanotubes (CNTs).

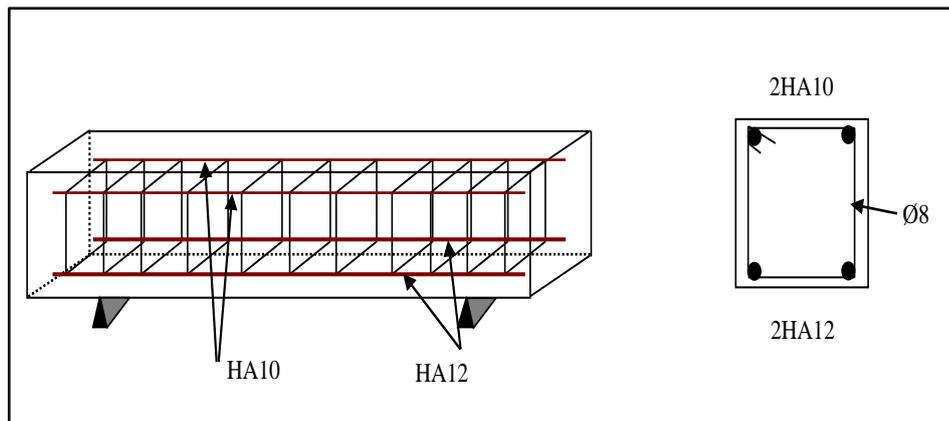


Figure II.19 Dimensions et ferrailage des poutres BA

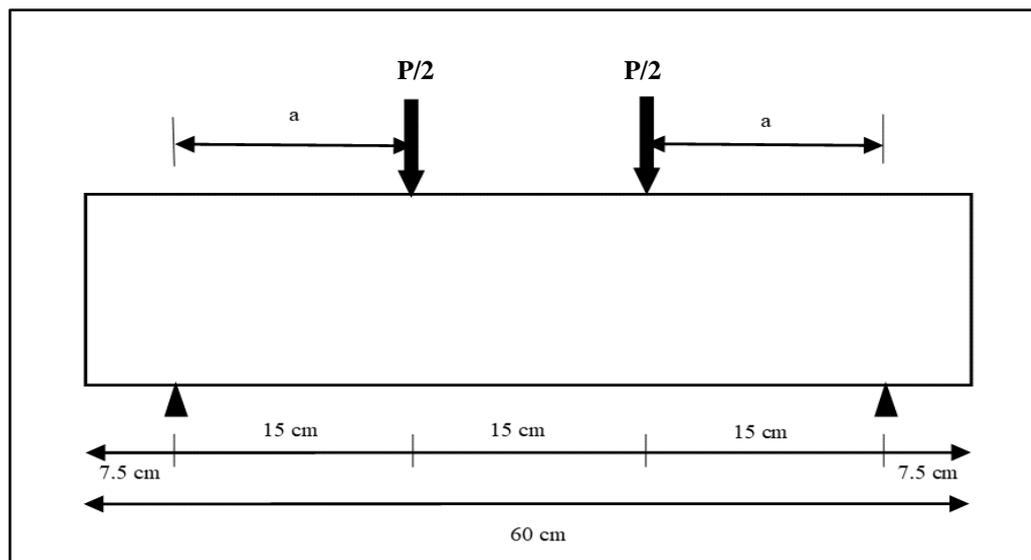


Figure II.20 Schéma statique de la poutre d'essai

Pour l'essai "Pull Off" [3], des éprouvettes en béton de dimensions  $10\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  sont coulées et renforcées par CFRP avec les mêmes pourcentages de MWCNTs que les poutres renforcées, dans le but de déterminer la force nécessaire pour le décollement (arrachement) du composite du support.

### II.2.3.2 Confection des poutres en BA

Après façonnage des armatures et préparation du coffrage, le béton est préparé à l'aide d'un malaxeur électrique et versé en deux couches, les poutres sont vibrées par une table vibrante et un talochage de la surface est effectué manuellement (Figs II.21 et II.22). Les poutres sont décoffrées après 48h et conservés au laboratoire jusqu'au jour de l'essai.



Figure II.21 Ferrailage des poutres d'essai



Figure II.22 Coffrage et procédure de coulage des poutres

### II.2.3.3 Application des lamelles Sika Carbodur

Les composites stratifiés ‘Sika Carbodur’, qui sont en forme de lamelles de 2m de longueur, sont découpés en dimensions souhaitées à l’aide d’un disque à tronçonner et seront nettoyées avant collage. La colle ‘Sikadur 30’, destinée pour adhésif, est par la suite mélangée en proportions selon les directives du fabricant avec un mélangeur électrique pendant 3 à 5 min jusqu’à l’obtention d’une couleur grise homogène (Fig. II.23).



Figure II.23 Mixage des composants A et B de la résine Sikadur 30.

Pour les poudres de nanotubes “ MWCNT’s”, importés, elles sont pesées et ajoutées au mélange selon les pourcentages voulus. Le mélange ainsi formé, afin d’être homogène”, est mixé à nouveau pendant 2 min jusqu’à sa dispersion et homogénéité du mélange.



La colle est mise en œuvre en deux couches : une couche sur le support et une autre sur la lamelle, cette dernière est plaquée sur le béton et pressé avec un rouleau en caoutchouc jusqu’à l’obtention d’un reflux tout autour des bords de la lamelle (Figs II 25 II 26 et II.27).

Figure II.24 Ajout des nanotubes MWCNTs au mélange



Figure II. 25 & II.26 Préparation du support et de la lamelle Sika Carbodur par la colle adhésive



Figure II.27 Placage de la lamelle Sika Carbodur sur le support béton

### II.2.3.4 Injection des fissures

Pour la série des poutres endommagées (fissurées) puis réparées, les fissures sont injectées avec de la résine liquide Sikadur 52 à l'aide d'une seringue jusqu'au débordement de la résine à partir de la fissure, l'opération est répétée autant de fois nécessaires pour la disparition des fissures. Les poutres sont par la suite ponçées et dépoussiérées avant collage des composites (Fig. II.28). Sur cette figure, on constate les traces de colmatage après les différentes injections des fissures par la résine liquide. La figure II.29, illustre une vue des poutres sous un autre angle (vue longitudinale).



Figure II.28 Vue des poutres endommagées puis réparées



Figure II.29 Poutres après injection des fissures par Sikadur 52

### II.2.4 Essai sur poutres BA renforcées par CFRP sans endommagement

Dans le but de déterminer l'efficacité de l'ajout des nanotubes MWCNT's au niveau de l'adhérence (matrice) entre renforcement CFRP et support béton et la résistance à la flexion de la poutre. Les poutres renforcées sont dénommées par 'PR1' suivi du pourcentage des MWCNT's

ajouté à la colle, tandis que la mention 'PC' désigne la poutre de contrôle. Toutes les poutres ont le même schéma de renforcement et mêmes dimensions des lamelles utilisées. Les pourcentages de MWCNT's étudiés varient entre 0.1 % et 0.5 % du poids du mélange (A+B) de la résine Sikadur 30.

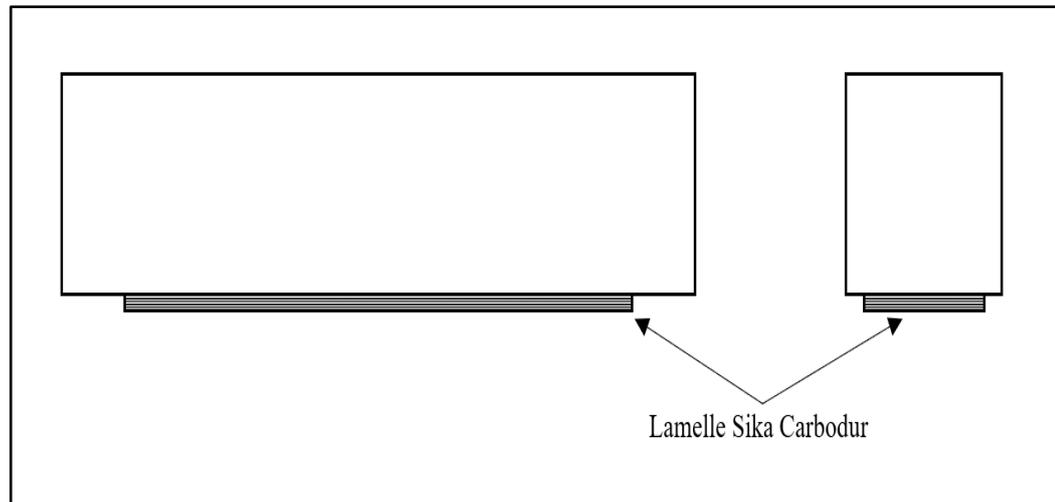


Figure II.30 Coupes longitudinale et transversale du renforcement par Sika Carbodur

Tableau II.15 Récapitulatif des détails des poutres renforcées par insertion CNTs

Désignation	Nbre d'éprouvettes	Dimensions du renfort	Pourcentage CNTs
PC	2	/	/
PR1-0	2	45 cm × 10 cm	0 wt%
PR1-0.5	2	45 cm × 10 cm	0.5 wt%
PR1-1	2	45 cm × 10 cm	1 wt%
PR1-0.5	2	45 cm × 10 cm	1.5 wt%
PR1-2	2	45 cm × 10 cm	2 wt%

### II.2.5 Essai sur poutres BA réparées par CFRP après endommagement

Cette partie est consacrée à l'étude de l'influence des nanotubes MWCNT's sur le comportement des poutres réparées par injection de résines et collage des matériaux composites. Pour y faire, on garde les mêmes conditions de confection ; préparation et procédures d'essai que pour la partie précédente. Les poutres d'essai dans cette partie sont pré-fissurées en appliquant une charge de 70% à 80% de la charge de rupture, jusqu'à l'apparition des fissures visibles.

Ces derniers seront injectés et colmatés avant le collage des lamelles Sika Carbodur. La mention 'PR2' suivi du pourcentage des MWCNT's est réservée pour les poutres réparées, tandis que la mention 'PC' désigne la poutre de contrôle.

Tableau II.16 Récapitulation des poutres réparées

<b>Désignation</b>	<b>Nbre d'éprouvettes</b>	<b>Dimensions du renfort</b>	<b>Pourcentage CNTs</b>
PC	2	/	/
PR2-0	2	45 cm × 10 cm	0 wt%
PR2-0.5	2	45 cm × 10 cm	0.5 wt%
PR2-1	2	45 cm × 10 cm	1 wt%
PR2-0.5	2	45 cm × 10 cm	1.5 wt%
PR2-2	2	45 cm × 10 cm	2 wt%

On présentera les différents résultats trouvés et les commentaires et discussions y afférentes dans le chapitre IV (résultats et discussions).

**CHAPITRE III :**  
**ANALYSE NUMERIQUE ET**  
**CHOIX DU LOGICIEL**

## **ANALYSE NUMERIQUE ET CHOIX DU LOGICIEL**

### **III.1 Introduction**

L'analyse numérique, c'est une branche des mathématiques, des mathématiques appliquées, dont le but est de mettre au point et d'étudier des méthodes de résolution numérique, afin de résoudre numériquement des équations qui sont issues de problèmes posés par la physique ou par les sciences appliquées [113]. En génie civil, cette analyse consiste à choisir un modèle de calcul, pas loin de l'exemple réel (structure, bâtiment, pont, barrage) et capable de résoudre le problème complexe trouvé dans la pratique. Son but, c'est de valider les résultats issus d'une campagne expérimentale, analyse analytique ou calcul manuel [114].

Nous présenterons, dans ce chapitre des modélisations diverses, par la méthode des éléments finis (MEF), concernant les éléments structuraux en béton armé, avant et après leur renforcement (après dégradation) par composites collés sans/avec insertion des nanotubes de carbone (CNTs). On utilisera pour cela le logiciel commercial Ansys (version APDL et /ou version Workbench). Notre travail sera composé de trois phases de modélisation. On commencera par la modélisation des éprouvettes (spécimens) utilisés dans la campagne expérimentale, en prenant les différents cas étudiés et ce, afin de valider les résultats expérimentaux trouvés, en termes de flèches, de déformations, de déplacements et de contraintes. Une modélisation d'éléments à vraies grandeurs (poutres en flexion) avec application des composites avec insertion des nanotubes (CNTs), dans la résine (adhésive), fera l'objet de la deuxième phase de notre étude numérique. Pour la troisième phase, on s'intéressera à la structure d'un pont réel, renforcé après diagnostic des types de dégradations. On procédera à trouver le modèle de calcul adéquat avec l'application des composites collés sur les poutres du tablier, avec et sans insertion des nanotubes (CNTs) à des pourcentages différents.

### **III.2 Logiciel de Modélisation**

En génie civil, il est demandé généralement de faire un bon choix pour l'outil de travail (logiciel), pour toute analyse numérique et ce, dans le but de bien s'approcher de la réalité, en trouvant un modèle adéquat et minimiser au maximum l'écart trouvé entre les résultats expérimentaux et numériques. Dans le monde des programmes informatiques, on trouve beaucoup de logiciels, basés sur la méthode des éléments finis, traitant la résolution des équations aux dérivées partielles pour la détermination de la matrice de rigidité et par conséquent la détermination des contraintes et déformations en n'importe quel nœud (point) de l'élément modélisé.

Parmi ces logiciels, nous citons 'ANSYS', qui est un logiciel de simulation pluridisciplinaire basé sur la méthode des éléments finis qui propose de nombreuses possibilités d'analyse tel que l'analyse statique, dynamique, linéaire et non linéaire. En plus de la non-linéarité, ANSYS est capable de prendre en considération la plasticité, la grande déformation, l'hyper-plasticité, le retrait et l'anisotropie des matériaux, et le plus important est qu'ANSYS prend en compte le comportement du béton fissuré et l'interaction entre les différents matériaux ce qui le rend le choix le plus pertinent pour notre étude [115].

Le logiciel Ansys a été développé par l'ingénieur John A. Swanson en 1970 et depuis, plus de 90 produits pour différentes applications se sont développés, dont nous citons :

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

La mise en œuvre du code ANSYS peut se faire sur deux environnements de logiciel différents selon la complexité de la géométrie et l'expérience de l'utilisateur :

#### a. ANSYS Classic :

Une solution destinée à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique pour la construction de modèles éléments finis à géométrie simple constructibles à l'aide d'opérations basiques. Le modèle est construit directement en utilisant le langage de script APDL (ANSYS Parametric Design Language).

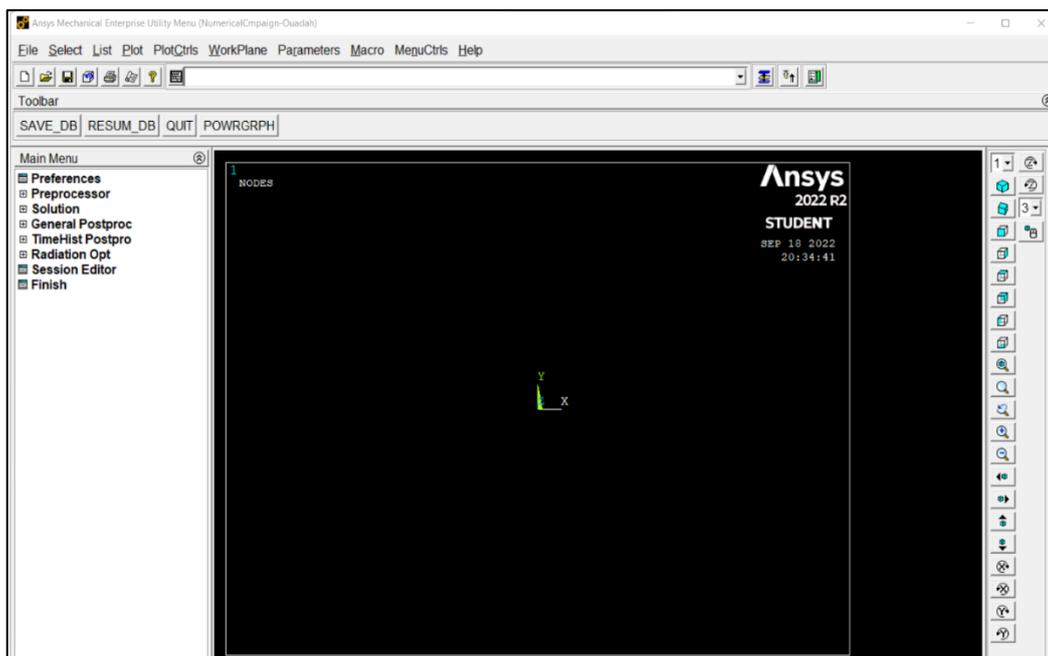


Figure III. 1 Interface Graphique Utilisateur GUI d'Ansys APDL

#### b. ANSYS Workbench :

Cette approche est plutôt adaptée pour le traitement des géométries complexes et aux utilisateurs moins expérimentés dans le domaine de calcul. Le travail dans cet environnement se fait principalement sur une géométrie et non plus sur un modèle, et la plateforme fait par la suite la conversion des requêtes d'entrée en code ANSYS. En plus de sa rapidité et efficacité, l'APDL propose, en comparaison avec le Workbench, les avantages suivants :

- Saisie directe des commandes ou fonctions à exécuter ;
- Import / création des géométries selon les besoins pour création du modèle ;
- Attribut des éléments, matériaux et création de maillage efficace et efficient ;
- Gestion des contacts, interactions complexes et couplage entre les différentes régions du modèle ;

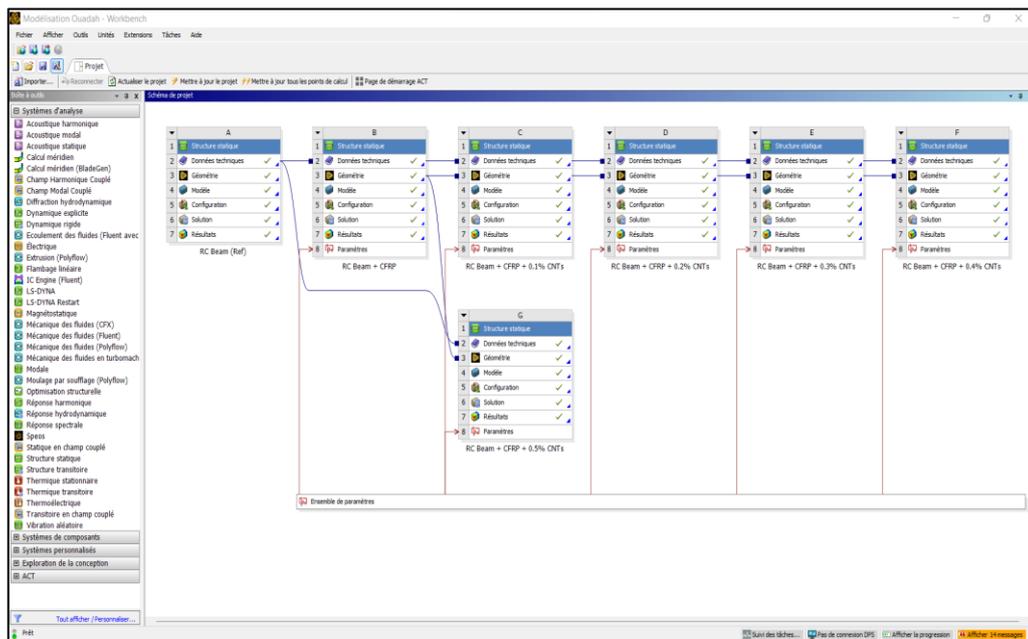


Figure III.2 Interface Graphique Utilisateur GUI d'Ansys Workbench.

ANSYS APDL propose dix processus qui permet la réalisation de plusieurs fonctions. Parmi les plus utilisés pour la discipline ‘Structure’ le processus PREP7 destiné à la création et mise en place du modèle, le Processus SOLU pour choisir le type d’analyse, le chargement, les conditions aux limites et l’exécution du logiciel, et le POST26 pour l’affichage graphique des résultats. Ces résultats sont donnés sous forme de listes, tableaux et graphes (déplacements, contraintes, déformations ... etc.), mais peut se faire sous forme de modèles 3D aussi. Les différents processus disponibles dans le logiciel ANSYS sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau III.1 : Processeur disponible dans le logiciel ANSYS

Processeur	Commande	Fonction
PREP7	/PREP7	Création du modèle (Géométrie, Matériaux ... etc.)
SOLU	/SOLU	Application du chargement et obtention de la solution
POST1	/POST1	Revue des résultats du modèle entier à un temps spécifié
POST26	/POST26	Revue des résultats à des points spécifiques
OPT	/OPT	Conception Initiale
AUX2	/AUX2	Transformation des fichiers binaires en forme exploitable.
AUX12	/AUX12	Spécifique aux analyses thermique (calcul et génération de la matrice de radiation)
AUX15	/AUX15	Translation des fichiers CAD
RUNSTAT	/RUNS	Statistique

### III.3 Méthode d'analyse non linéaire

Une analyse numérique non linéaire est un type d'analyse numérique où la charge totale appliquée sur le modèle est divisée en une série d'étapes et d'augmentations appelées '*Mise en charge*' ou '*Load Steps*', la matrice de rigidité du modèle sera ajustée à la fin de chaque itération afin de refléter les changements non linéaires de la rigidité avant de passer à l'augmentation de charge. L'équilibre des itérations de Newton-Raphson est le point d'appui du logiciel ANSYS pour la mise à jour de la rigidité [116].

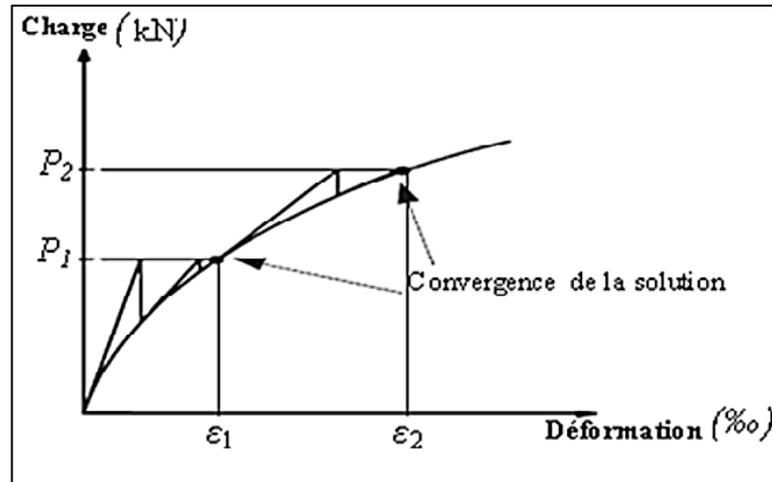


Figure III.3 Convergence par itérations de Newton-Raphson [116]

Le vecteur de l'équilibre des charges (la différence entre les forces de rappel et les charges appliquées) est évalué avant chaque solution par l'approche Newton-Raphson, et une solution linéaire par la condition d'équilibre des charges et le contrôle de la convergence est effectué. En cas de non-convergence, la matrice de rigidité est mise à jour, le vecteur d'équilibre est réévalué et une nouvelle solution est atteinte. Plusieurs chercheurs ont travaillé sur la modélisation des structures ou les éléments structuraux par la méthode des éléments finis en prenant le vrai comportement des matériaux constituant l'élément modélisé, à savoir le comportement non linéaire du béton, de l'acier HA ou l'acier doux et parfois le composite et sa colle adhésive. Les figures III.4 et III.5, montrent le vrai comportement mécanique des matériaux béton et acier HA.

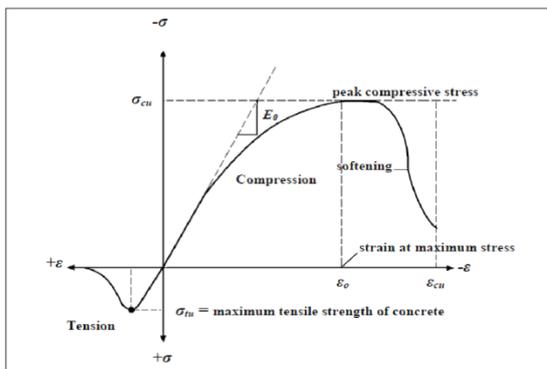


Figure III.4 Comportement du béton

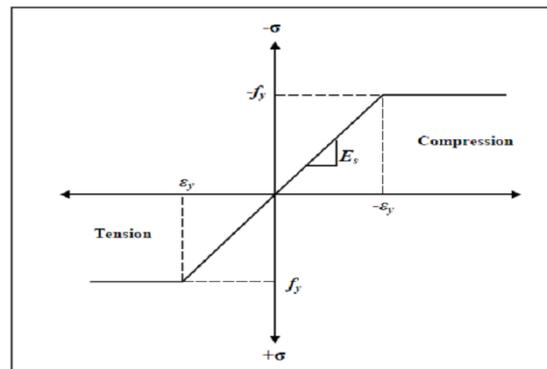


Figure III.5 Comportement de l'acier HA

Une comparaison entre les différents types des aciers utilisés en génie civil (acier HA, acier doux, acier précontraint, fibre de carbone, composite TFC), met en évidence (Fig. III.6), la

haute performance de la fibre de carbone, concernant et sa résistance et son module de Young très élevés, par rapport aux caractéristiques mécaniques des autres aciers [117].

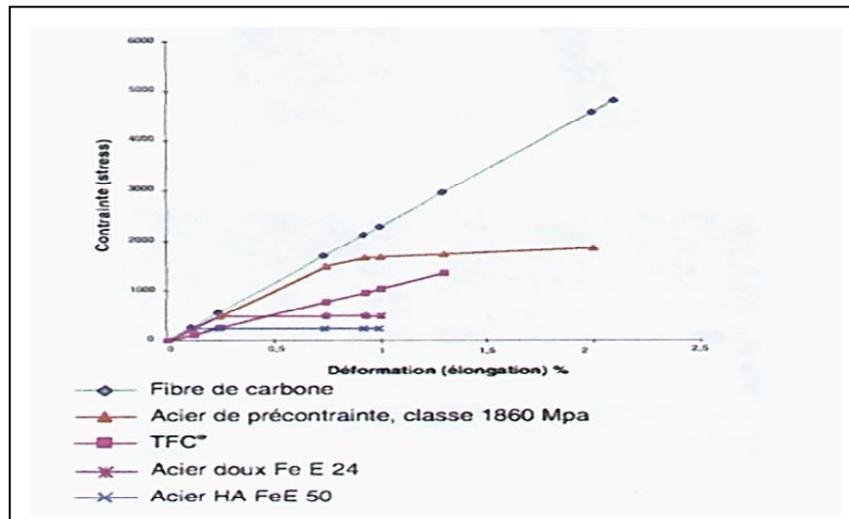


Figure III.6 Lois de comportement des aciers de construction

### III.4 Modélisation des éléments en béton armé renforcés

L'analyse numérique dans notre étude est composée de trois parties. La première partie est consacrée à la modélisation numérique des éprouvettes (spécimens) prises dans la partie expérimentale, avec application des différents composites et les pourcentages des nanotubes (CNTs). L'objectif, c'est de trouver un modèle numérique proche des exemples pris dans notre campagne expérimentale et de caler les résultats expérimentaux trouvés.

Pour la deuxième partie, on s'intéressera à un travail purement numérique (théorique) en prenant des cas d'exemples de poutres (à vraies gradeurs) en béton armé, sous flexion 4 points, renforcées par applications des composites CFRP. On s'étalera dans l'explication de l'éventualité d'insertion des nanotubes (CNTs) en pourcentage, en jouant sur les valeurs des caractéristiques mécaniques (modules de Young, coefficients de Poisson, modules de cisaillement et l'isotropie et/ou l'anisotropie des matériaux). Notre référence est celles des poutres expérimentales, testées au laboratoire de l'Ecole Nationale Polytechniques en 2011 par Abdessemed et Kenai [118]. Une étude comparative fera l'objet dans le prochain chapitre.

Concernant la troisième partie, elle sera consacrée à un exemple de cas réel, de pont à poutres en béton armé, se trouvant dans la Wilaya de Tipaza et qui a subi des dégradations au niveau de ses éléments porteurs (poutres du tablier). Sur la base de l'expertise établie par l'Entreprise SAPTA [119], on a procédé à placer les fibres de carbone "TFC", sur les parties inférieures des poutres maîtresses (qui travaillent en traction) et sur les parties de l'âme travaillant en cisaillement. Une analyse numérique, avec détail des phases de la modélisation, fera l'objet d'explication. On note, notre contribution dans l'insertion des nanotubes (CNTs) dans la modélisation numérique, afin de voir leurs effets sur les résultats obtenus et surtout pour l'analyse modale et la détermination des modes et fréquences propres de vibration de l'ouvrage (pont), avant et après renforcement.

### III.4.1 Modélisation des éprouvettes d'essai renforcées par CFRP et CNTs

#### III.4.1.2 Géométrie des spécimens et schéma statique

Les éprouvettes, en formes de poutres, confectionnées dans l'expérience, ont les dimensions illustrées dans la figure III.7. Il s'agit de poutre en flexion 4 points, de dimensions (150×150×600) mm (Fig. III. 8).

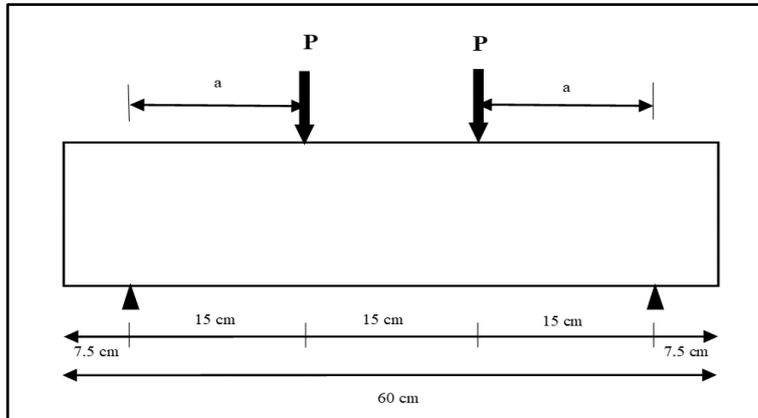


Figure III.7 Dimensions et schéma statique de l'éprouvette

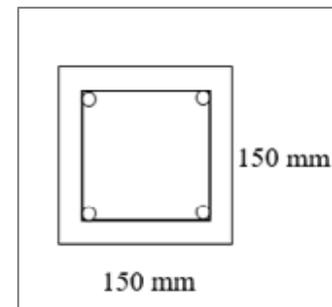


Figure III.8 Section droite

Le ferrailage et sa dispositions au niveau de l'éprouvette d'essai est illustré dans la figure III.9. Il s'agit de barres 2HA12 en bas et 2HA10 en haut, avec des étrillés en  $\varnothing 8$ .

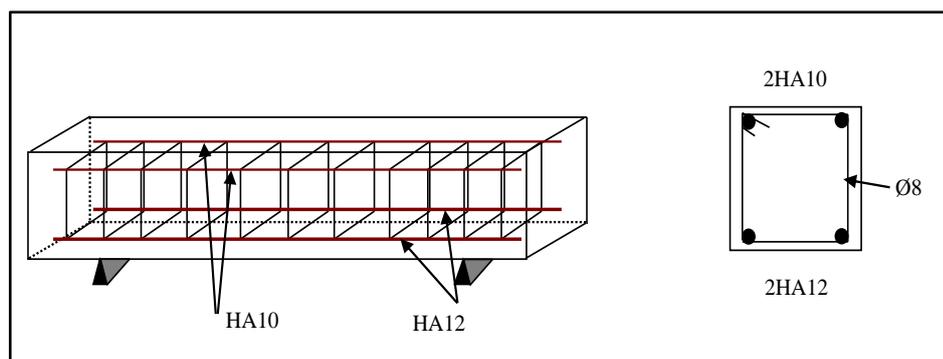


Figure III.9 Disposition du ferrailage de la poutre d'essai

#### III.4.1.2 Propriétés des matériaux

Les matériaux pris dans la modélisation avec les éléments choisis (dans la bibliothèque de l'Ansys) pour chaque matériau, sont donnés comme suit.

##### a/ Le Béton

Dans ANSYS, le béton est modélisé par l'élément **SOLID 65**, ayant huit nœuds avec trois degrés de liberté chacun (des translations dans les trois directions nodales) (Fig. III.10). L'élément peut subir des déformations plastiques, un écrasement, une fissuration et un fluage [120].

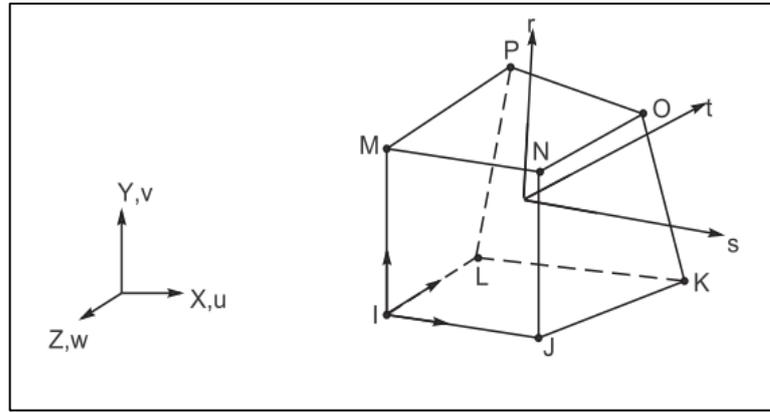


Figure III. 10 Elément 3D SOLID 65 [120]

L'élément SOLID65 est défini par les propriétés linéaires isotropiques et multilinéaires isotropique du béton, qui sont donnés à partir des caractéristiques suivantes :

- Module d'élasticité  $E_c$  ;
- Résistance à la compression ultime  $f'_c$  ;
- Résistance à la traction ultime  $f'_t$  ;
- Coefficient de Poisson  $\nu$  ;
- Coefficient de transfert de cisaillement  $\beta_t$  ;
- La relation contrainte-déformation en compression uniaxiale ;

Les propriétés du béton choisis dans cette étude sont : Le module d'élasticité  $E_c=25000$  MPa, la résistance à la compression  $E_c= 29$  MPa, La résistance à la traction  $f'_t=3$  MPa, le coefficient de Poisson du béton assumé égale à  $\nu=0.2$  et un coefficient de transfert de cisaillement qui varie entre 0.05 et 0.25 et qui est pris égale à  $\beta_t= 0.2$ . En compression uniaxiale, la courbe contrainte-déformation du béton est linéairement élastique jusqu'à 30% de la contrainte maximale de compression. La contrainte augmente graduellement au-dessus de ce point jusqu'à la contrainte maximale. Les équations suivantes sont utilisées pour calculer la courbe multilinéaire isotropique du béton :

$$f = \frac{E_c \varepsilon}{1 + (\varepsilon/\varepsilon_0)^2} \dots \dots \dots (1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \dots \dots \dots (2)$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \dots \dots \dots (3)$$

Le premier point de la courbe qui est définie par l'utilisateur à  $0.3f'_c$  doit satisfaire selon ANSYS la loi de Hooke (équation 4) est calculé par l'équation (5).

$$E = \sigma / \varepsilon \dots \dots \dots (4)$$

Les points intermédiaires sont obtenus à partir de l'équation (3) tandis que la déformation à la résistance ultime de compression  $\varepsilon_0$  et calculée par l'équation (4), au-delà du dernier point défini par  $f_c$  et  $\varepsilon_0$  le comportement du béton est supposé parfaitement plastique.

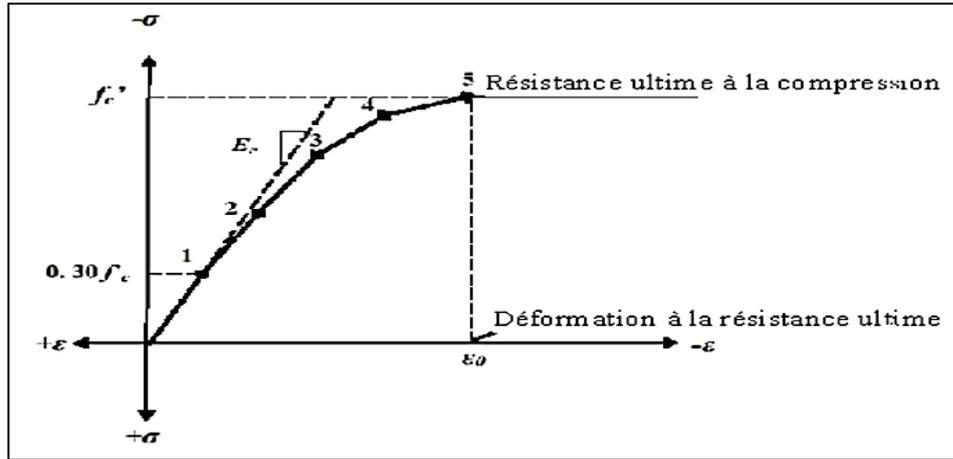


Figure III.11 Diagramme contrainte-déformation simplifié du béton en compression

Les valeurs trouvées pour chaque étape (step), concernant les déformations et les contraintes, sont données dans le tableau ci après (Tab. III.2).

Tableau III.2 : Coordonnées déformations– contraintes en différents points

Point	Déformation (ε) en ‰	Contrainte (σ) en MPa
1	0.348	8.70
2	0.672	15.49
3	0.989	20.92
4	1.298	24.71
5	2.320	29

Les propriétés mécaniques entrées (input) dans le programme (pré processeur), sont données par la figure III.12.

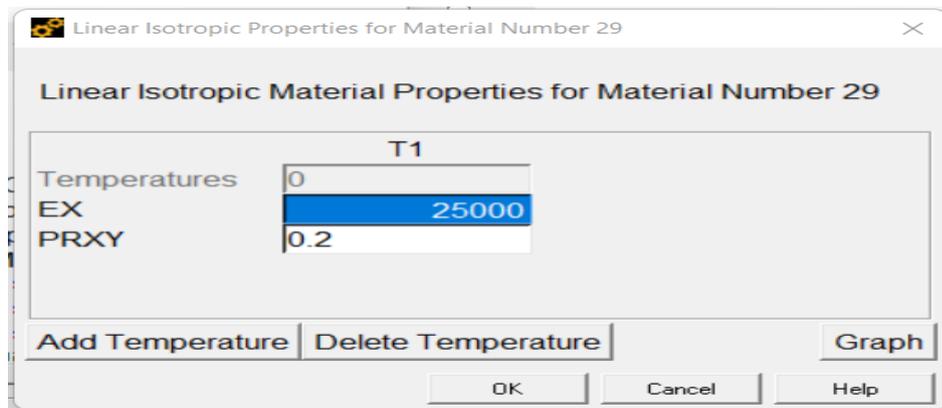


Figure III.12 Propriétés mécanique du béton (Solid65)

Les figures III.13 et III.14, illustrent les autres caractéristiques mécaniques du ‘‘Solid 65’’.

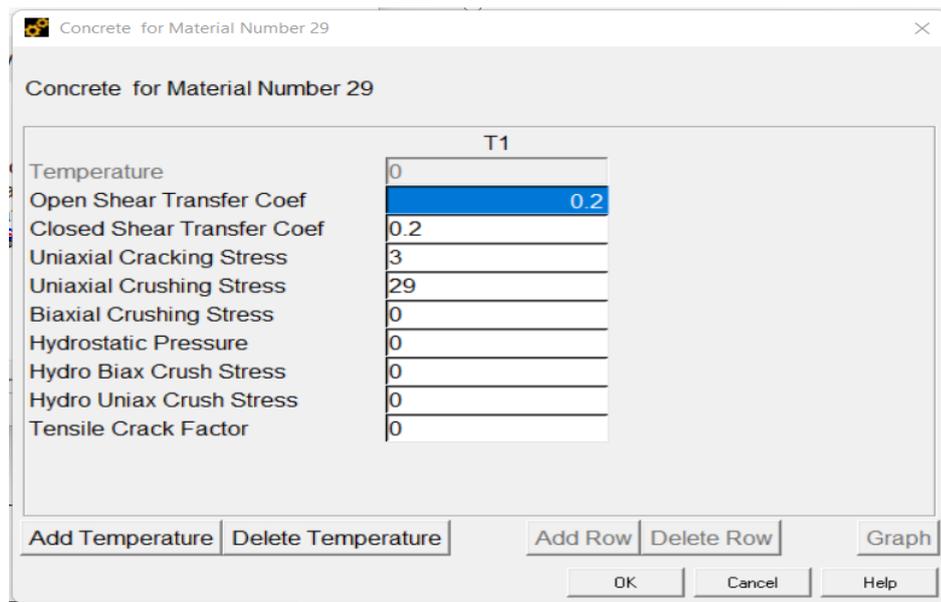


Figure III.13 Caractéristiques isotropiques du béton (Solid 65)

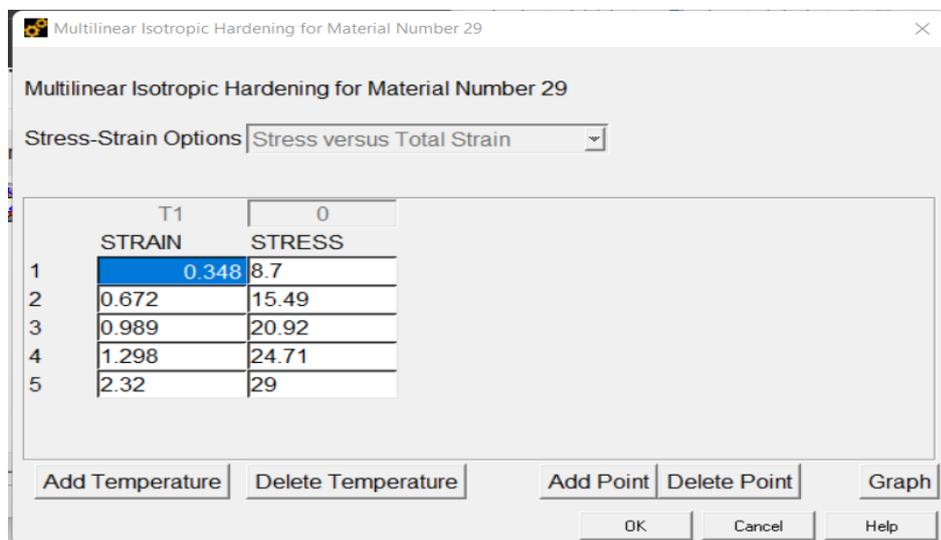


Figure III.14 Insertion des valeurs des contraintes et déformation du béton utilisé (Comportement non linéaire)

### b/ L'acier

Pour tous les aciers HA, utilisés dans le béton, L'élément LINK180 est la meilleure représentation des aciers de renforcement, avec ces deux nœuds, sans effet de cisaillement ou de flexion. Les contraintes sont supposées uniformes sur tout l'élément. La figure III.15 montre l'élément choisi dans la bibliothèque de l'Ansys.

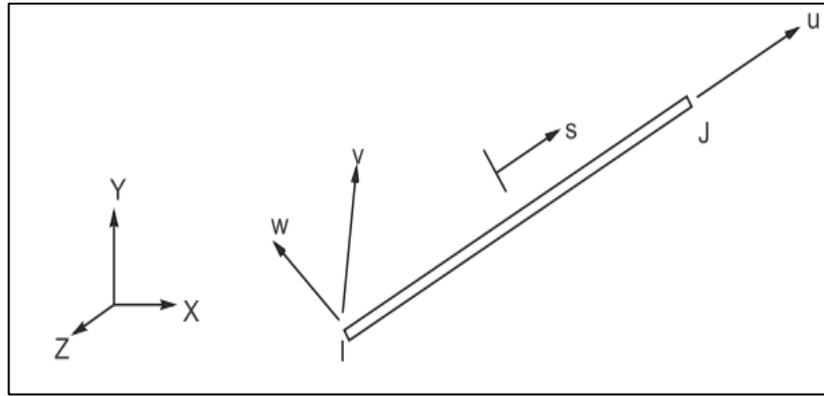


Figure III.15 Elément 3D LINK180 [120]

L'acier représente les caractéristiques suivantes avec la courbe contrainte-déformation représenté dans la figure III.16

- Module d'élasticité  $E_c = 210\ 000\ \text{MPa}$  ;
- Contrainte de traction  $F_y = 410\ \text{MPa}$  ;
- Coefficient de Poisson  $\nu = 0.3$ .

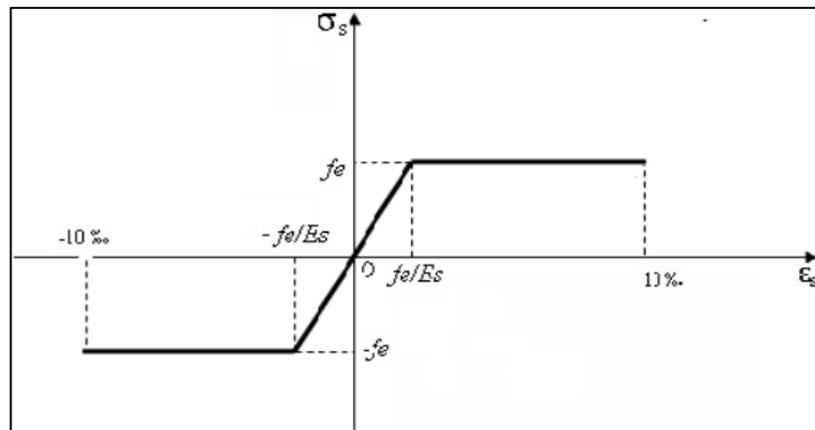


Figure III. 16 Diagramme contrainte – déformation de l'acier [120]

Les propriétés mécaniques des aciers, qui sont entrées (input) dans le programme (pré processeur), sont données par la figure III.17.

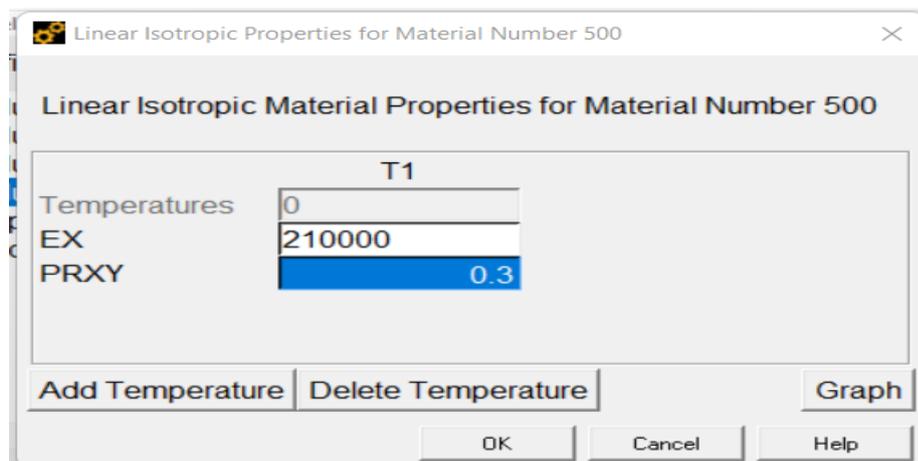


Figure III.17 Propriétés mécaniques de l'acier isotropique

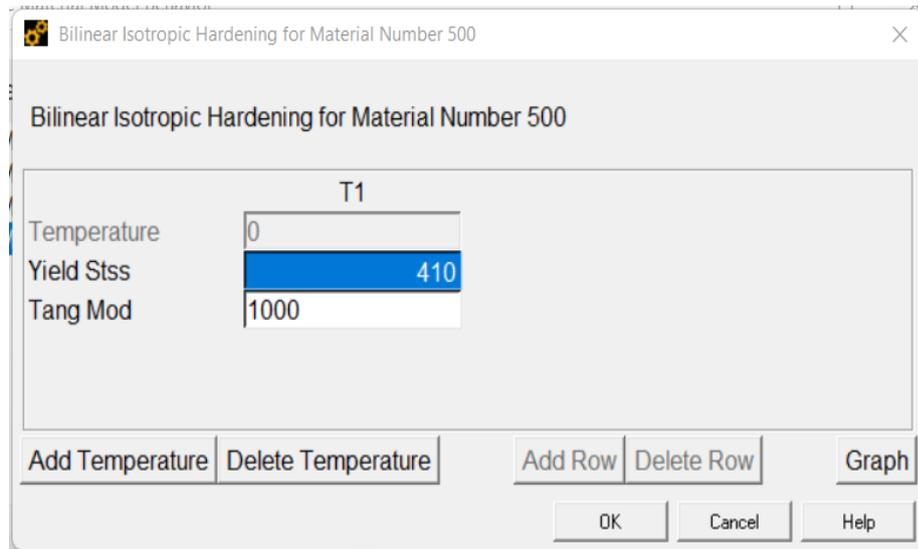


Figure III.18 Insertion des différents paramètres De l'acier dans ANSYS

### c/ Les composites

Dans ANSYS, le comportement des matériaux composites est représenté via l'élément SOLID185 avec ses huit nœuds et deux modes (Solid 185 Structural) (Fig. 19). Il est le mieux adapté pour la représentation de la résine époxy (LAYERED SOLID), avec la possibilité d'introduire plusieurs couches des composites avec différentes orientations. Les deux modes acceptent des propriétés orthotropiques [121].

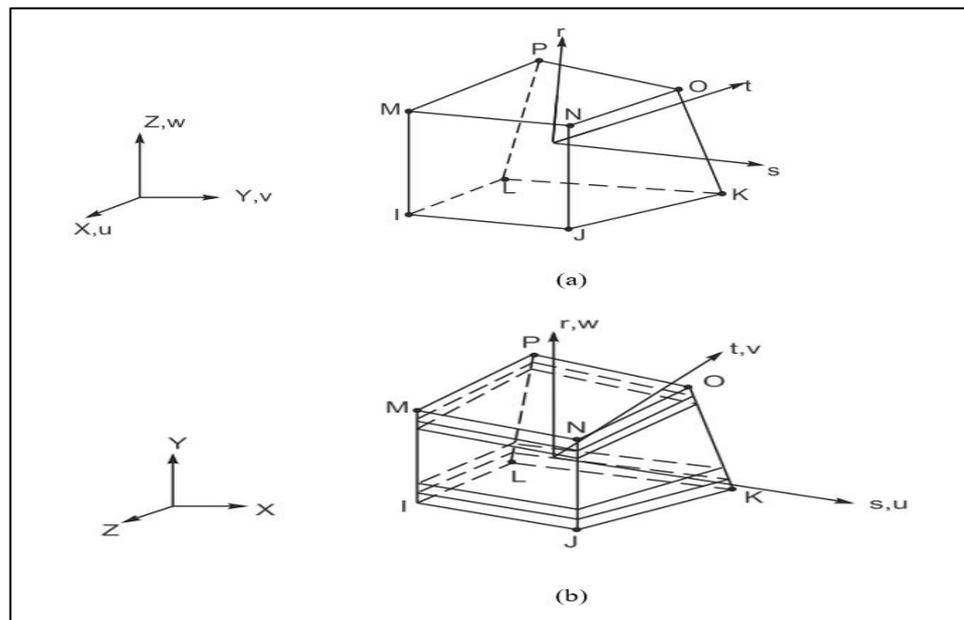


Figure III.19 Élément 3D Solid 185 avec ces deux modes : (a) structural ; (b) layered [121]

Les deux composites, qu'on a introduits, sont les lamelles stratifiées, appelées "Sika Carbodur S", pour le renforcement de traction et le monodirectionnel "Sika Wrap", pour le renforcement de cisaillement.

**\* Les lamelles Sika Carbodur**

Les lamelles Sika Carbodur sont des composites CFRP et sont modélisé avec l'élément Solid 185 Layered. Toute modélisation doit fourni les informations suivantes [122]:

- Nombre de couches ;
- L'épaisseur de chaque couche ;
- L'orientation de la direction de fibre pour chaque couche ( $\theta$ ) ;
- Module d'élasticité du composite de FRP dans les trois directions (Ex, Ey, et Ez) ;
- Coefficient de poisson major pour les trois plans ( $\nu_{xy}$ ,  $\nu_{yz}$  et  $\nu_{xz}$ ).
- Module de cisaillement du composite de FRP dans les trois plans (Gxy, Gyz et Gxz) calculé par l'équation (5) ;

$$G_{xy} = \frac{E_x E_y}{E_x + E_y + 2E_x \nu_{xy}} \dots\dots\dots (5)$$

Les différentes caractéristiques mécaniques des composites CFRP insérées dans le logiciel ANSYS APDL sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau III.3 Caractéristiques mécaniques des lamelles CFRP.

Caractéristiques mécaniques / Composite	Module Young E (MPa)	Coef. Poisson majeur	Contrainte cisaillement (MPa)	Module Cisaillement (MPa)	Epaisseur (mm)
Sika Carbodur	Ex= 170 000	$\nu_{xy}=0.2$	3100	Gxy=3370	.2
	Ey = 4800	$\nu_{yz}=0.2$		Gyz=2000	
	Ey = 4800	$\nu_{xz}=0.2$		Gxz=2950	

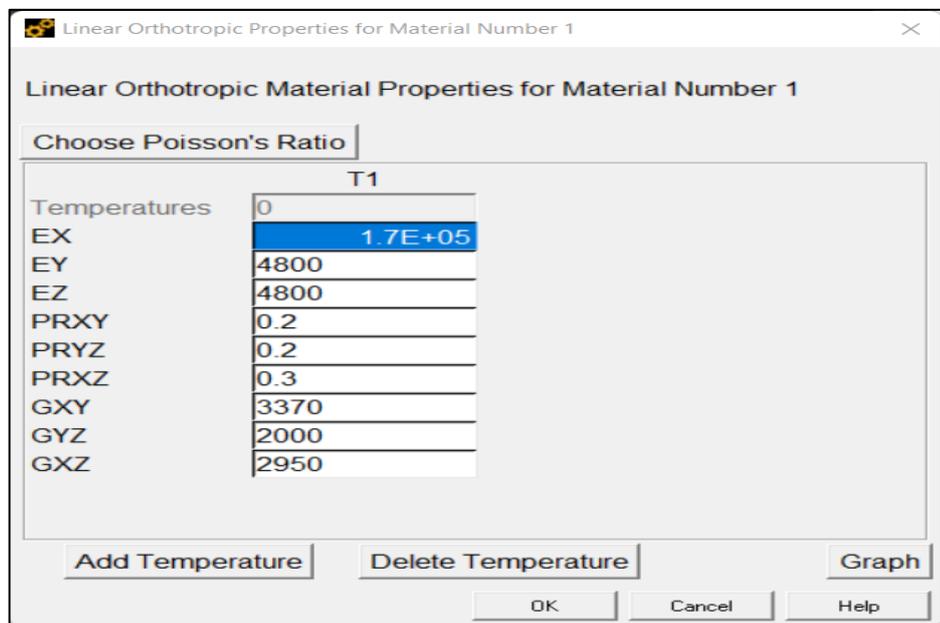


Figure III.20 Insertion des caractéristiques des lamelles Sika Carbodur dans logiciel

**\* La résine époxy SIKADUR 30**

En revanche, la résine époxy (adhésif) est définie avec l'élément Solid 185 Structural, caractérisée par les valeurs suivantes (tab. III.4). L'insertion de ces valeurs dans le logiciel a été effectué (Fig. III.21)

Tableau III.4 : Propriétés mécaniques de la résine époxy Sikadur 30.

Module d'élasticité ( $E_c$ )	9 600 MPa
Coefficient de Poisson ( $\nu$ )	0.4

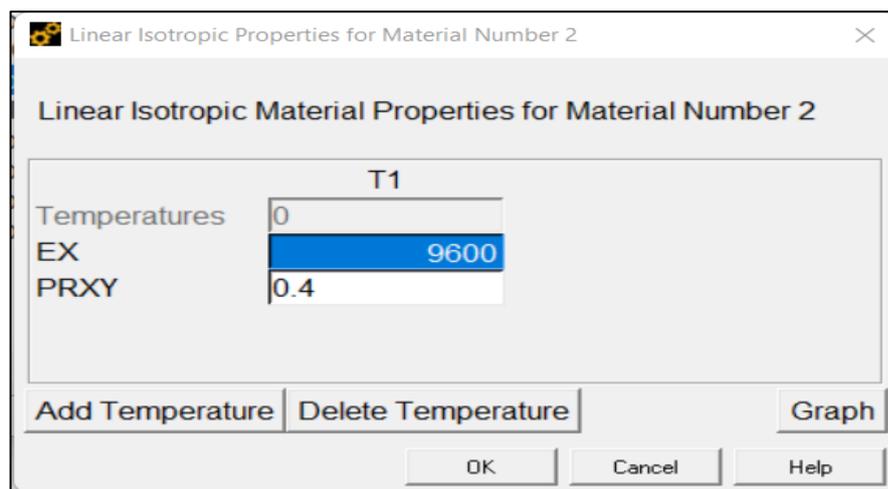


Figure III.21 Insertion des caractéristiques de la résine époxy

**\* Les nanotubes CNTs**

Pour les poudres ‘‘nanotubes CNTs’’, qui sont introduits dans la résine époxydique, ont pour rôle le perfectionnement des caractéristiques mécaniques de cette résine, dont plus particulièrement le module de Young ( $E$ ). Selon le pourcentage introduit, on peut déterminer l'amélioration de cette valeur de  $E$ . Le tableau ci-après, donne les valeurs de  $E$  et du coefficient de poisson, pour les pourcentages de 0%, 0.5% , 1%, 1.5% et 2%. (Tab. III.5).

Tableau III.5 Caractéristiques mécaniques des composites avec CNTs

Notation poutre	(Ratio CNTs) (%)	Module E (GPa)	Coef. Poisson
BC (temoin)	-		-
BL (renforcée)	(0%)	12.5	0.25
BR1	(0.5%)	20	0.25
BR2	(1%)	25.5	0.25
BR3	(1.5%)	30	0.25
BR4	(2%)	38.5	0.25

### III.4.1.2 Analyse numérique

Afin d'établir une bonne distribution de la charge et de garantir une meilleure connectivité entre les différents éléments du modèle, il est essentiel de bien choisir un maillage adéquat. Les éléments du modèle sont divisés en plusieurs particules élémentaires avec les mêmes propriétés et examiner chaque particule individuellement. L'objectif est de déterminer les contraintes et les déformations aux points d'intégrations des petits éléments après application des charges et identification des conditions aux limites du modèle étudié. Le maillage est réalisé en utilisant le 'Mesh Tool' de l'étape *Préprocesseur*, ou un maillage rectangulaire est choisi avec une taille de maillage est égale à 10 mm afin d'obtenir des résultats plus précis, tout en commençant par les lignes du modèle jusqu'aux volumes pour assurer que les différents nœuds des éléments discrétisés seront parfaitement alignés pour assurer une connectivité parfaite. Le schéma de la discrétisation et emplacement des éléments de renforcement est la suivante (Figs. III.22 et III.23).

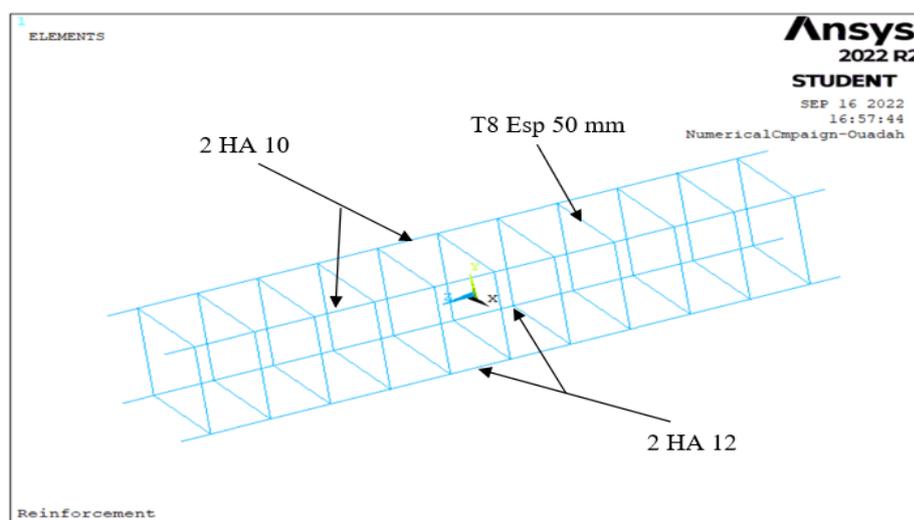


Figure III. 22 Modèle EF représentant le renforcement des poutres BA.

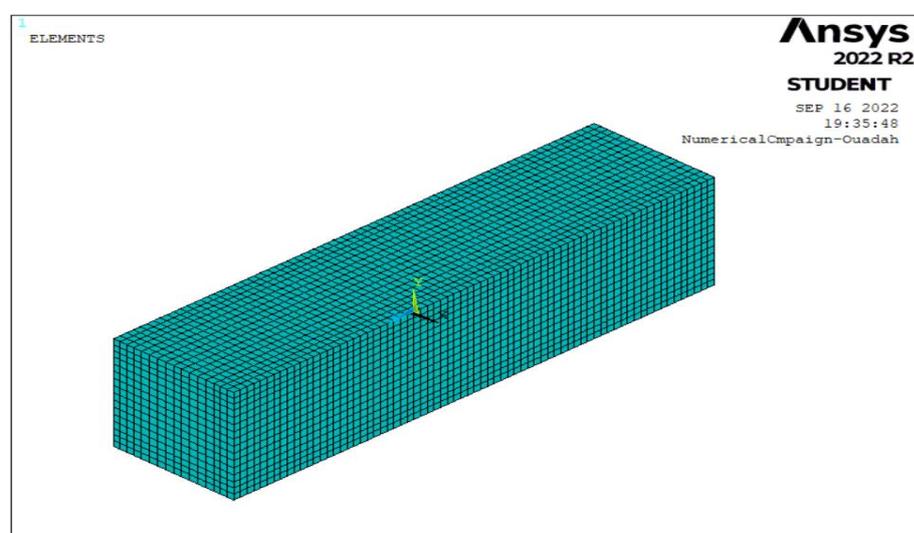


Figure III.23 Maillage de la poutre après discrétisation

Le nombre d'éléments pour chaque matériau dans notre modèle EF développé est représenté dans le tableau (III.5) :

Tableau III.6 : Nombre d'éléments du maillage pour les poutres modélisées.

Modèle	Nombre des éléments			
	SOLID65	LINK180	SOLID185	Total
Poutres BA non renforcées	18432	704	/	19136
Poutres BA renforcées par lamelles CFRP	18432	704	900	20036

Les conditions aux limites ainsi que le chargement adopté pour ce modèle sont représentées dans la figure III.24.

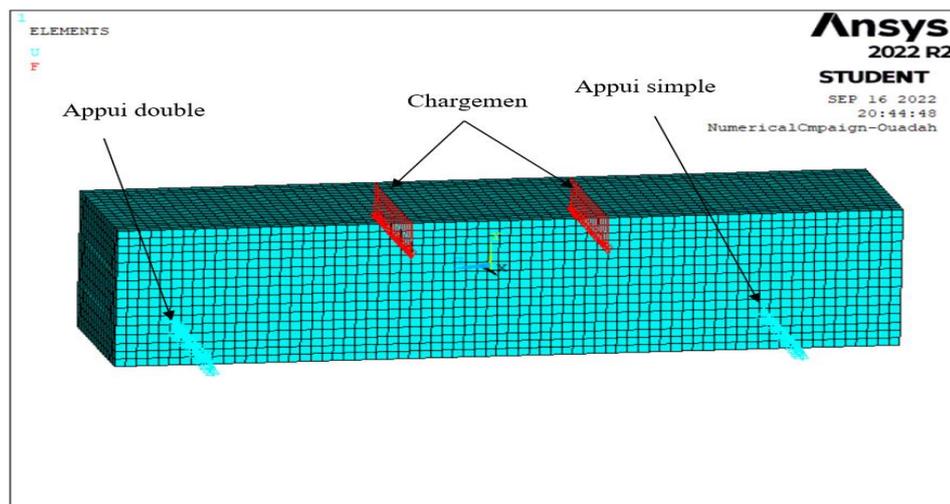


Figure III.24 Application des charges et conditions aux limites.

Notons que, pour les poutres renforcées par composites, les lamelles Sika Carbodur et la résine époxy Sikadur 30, elles sont modélisées comme élément volume dans la zone de renforcement (zone entre appuis). Les conditions aux limites et le chargement reste identique.

#### III.4.2 Modélisation des poutres renforcées par CFRP et CNTs

La modélisation des poutres en béton armé, renforcées par composites collés et améliorées par les nanotubes CNTs, se fera de la même manière que celle détaillée auparavant. On utilisera le logiciel Ansys/Apdl pour cela.

### III.4.2.1 Géométrie des poutres d'essai et schéma statique

Les poutres utilisées dans cette partie, sont celles perfectionnées par Abdessemed et Kenai [118]. Les dimensions adoptées sont (160×180×1700) mm (Fig. III. 25). Le ferrailage choisi est de : 3HA12 à la fibre inférieure et 3HA10 pour la fibre supérieure et les étriers sont de diamètre 8 mm (Fig. III.26).

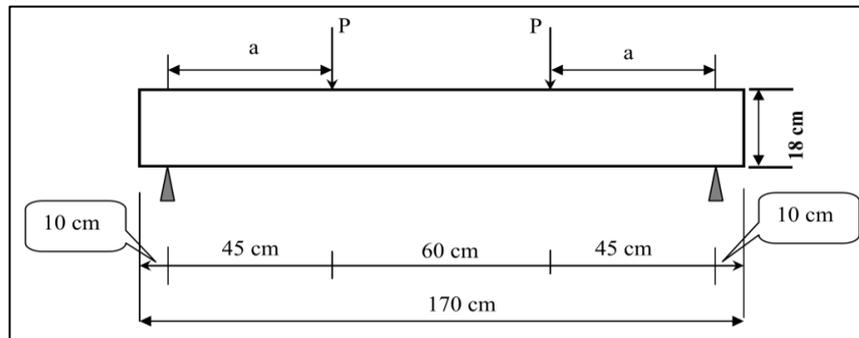


Figure III.25 Dimensions et schéma statique de la poutre d'essai

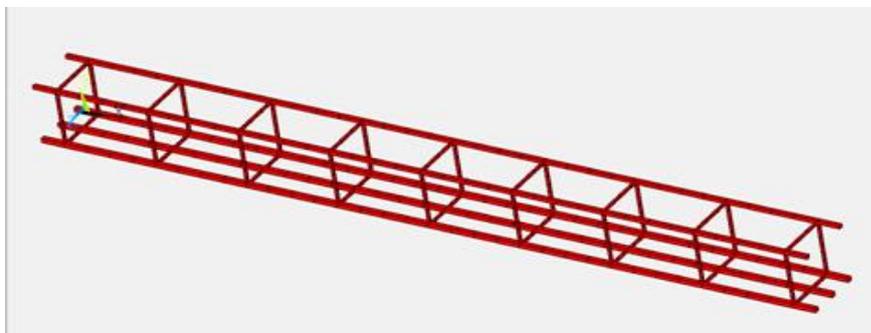


Figure III.26 Schéma de ferrailage adopté

### III.4.2.2 Propriétés des matériaux utilisés

On a utilisé les mêmes matériaux pris que dans la modélisation précédente (spécimens expérimentaux), avec les éléments choisis (dans la bibliothèque de l'Ansys), qui sont le béton et les aciers (isotropiques), les matériaux composites (anisotropiques) et la résine (orthotropique). Les nanotubes (CNTs) sont introduits dans le calcul à des pourcentages allant de 0% à 2%. La seule différence consiste dans la géométrie, les nombre et le type de barres HA. On a pris de même, un comportement non linéaire de ces matériaux utilisés (Fig. III.27).

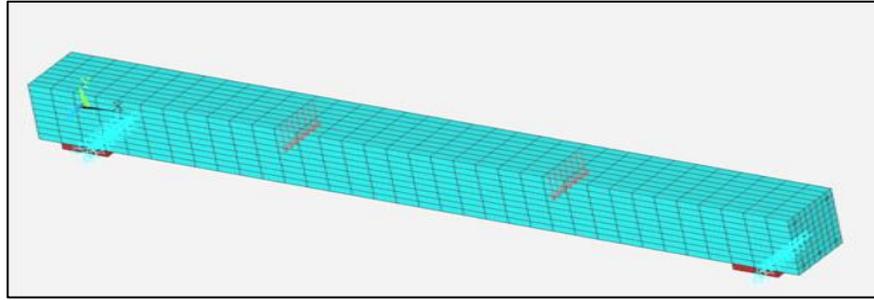


Figure III.27 Vue de maillage de la poutre modélisée

### III.4.2.3 Analyse numérique de la poutre

#### a/ Description des renforcements

Il s'agit du renforcement de la poutre par composite CFRP, en flexion et en flexion/cisaillement. En plus de la poutre témoin non renforcée (RA), on a utilisé, pour la 1<sup>ère</sup> poutre renforcée (RA1), à la partie inférieure de cette poutre, une lamelle de fibre de carbone (Sikacarbodur), sur une longueur de 120 cm et une largeur de 8cm et ce, pour contrer l'effet de peeling off [123], provoqué par des fissures horizontales au droit de l'enrobage (Fig. III. 28).

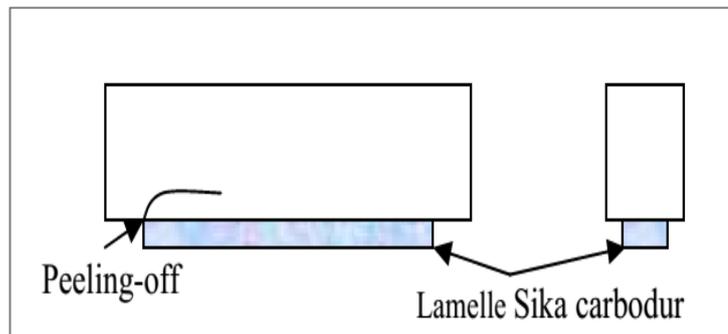


Figure 0.28 Mode de renforcement par lamelles (RA1) [123]

Pour la 2<sup>ème</sup> poutre renforcée (RA2), on a utilisé le mode le plus répandu dans la pratique surtout dans le cas de renforcement des poutres (en béton) du tablier du pont. Il s'agit du plaquage d'une lamelle de fibre de carbone (Sikacarbodur) à 120 cm de longueur sur la face inférieure de la poutre et du collage de bandes de tissu "Sikawrap" en bandes au nombre de six (6) de 10 cm de large et de 52 cm de longueur sur les faces latérales et la face inférieure espacées entre elles de 12 cm en commençant d'une extrémité pour y arriver à l'autre extrémité (Fig. III.29).

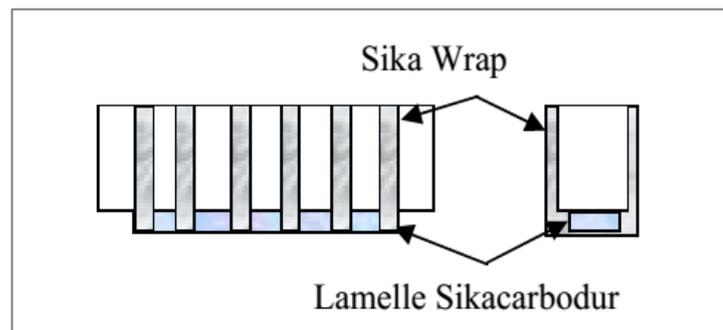


Figure 0.29 Mode de renforcement en "U" (RA2) [123]

### b/ Discrétisation par éléments finis

Dans une première étape, une analyse par éléments finis nécessite le maillage du modèle. En d'autres termes, le modèle est divisé en un certain nombre de petits éléments, et après le chargement, les contraintes et les déformations sont calculées aux points d'intégration de ces petits éléments. La formulation de la géométrie du matériau béton (solid 65), considéré comme un élément de volume (block), dont le nombre de maille est pris égal à 2448 éléments. Le deuxième matériau est l'acier (link 180), considéré comme un élément barre.

Cet élément est discrétisé par des éléments barres connectés nœud par nœud dans le béton, pour assurer la connectivité nodale. Le ferrailage contient des barres longitudinales de haute adhérence de 34 éléments et des armatures transversales en 30 éléments.

Tableau 0.7 Nombre d'éléments discrétisés pour les poutres

Modèle	Nombre d'éléments				
	Solid 65	Link 180	Shell 181	Solid 185	Total
Poutre non renforcée	2448	404	/	128	2980
Poutre RA1	2448	404	96	128	3076
Poutre RA2	2448	404	360	128	3340

Les nœuds de l'élément de couche de FRP (shell 181) et les pièces discrétisées de l'élément de l'acier (link 180) sont reliés aux nœuds des éléments béton (solide 65) adjacents afin de fournir le lien parfait (*glue*) entre les deux matériaux. La figure III.30, illustre la connectivité des éléments. Dans cette étude, on a assumé une liaison parfaite entre des matériaux, pour fournir le lien parfait, l'élément de liaison pour l'acier d'armature (link 180) était relié entre les nœuds de chaque élément en béton (solide 65) adjacent, si les deux matériaux partagent les mêmes nœuds. La même approche a été adoptée pour les matériaux composites CFRP (Shell 181).

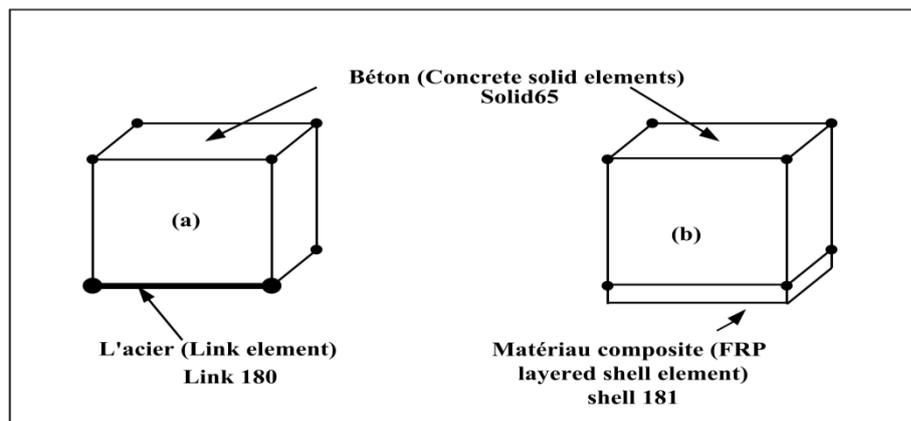


Figure 0.30 Connectivité d'éléments  
(a) connectivité béton/acier (b) connectivité béton/couche de FRP

### *c/ Chargement et condition aux limites*

Le chargement adopté et les conditions aux limites choisies pour la poutre de référence, et pour les deux poutres renforcées, sont donnés avec un modèle, qui est chargé avec les mêmes conditions que l'essai expérimental. Pour cette étude, on a utilisé un ordinateur portable, pour chaque analyse, la durée de compilation a donné un temps d'analyse allant jusqu'à 5 heures pour chaque modèle.

## **III.4.3 Modélisation des poutres de tablier de pont renforcées par CFRP et CNTs**

### **III.4.3.1 Introduction**

Afin d'étudier l'effet du renforcement d'un tablier de pont par matériaux composites traditionnelles et nano-composites sur le comportement dynamique de ce dernier, trois différents modèles EF sont créés :

- a. Modélisation du pont sans aucun renforcement ;
- b. Modélisation du pont renforcé par des matériaux composites traditionnelles ;
- c. Modélisation du pont renforcé par nano-composites ;

Les modèles seront exécutés via le logiciel ANSYS APDL en gardant les mêmes choix des matériaux du chapitre précédent.

### **III.4.3.2 Description du cas d'étude**

Le pont choisi pour cette étude est un passage supérieur sur Oued el Hachem à Cherchell, 80 Km d'Alger. Sa localisation dans la Wilaya de Tipaza classée zone III et sa proximité de la mer lui rend susceptible à des fortes activités sismiques ainsi que des phénomènes de carbonatation du béton, ce qui nécessite des réparations et renforcement de ces éléments porteurs. L'ouvrage en question est un pont hyperstatique à quatre travées et un tablier de quatre poutres maitresses en béton armé à inertie variable, liées par des entretoises et longrines surmontées d'une dalle en BA, alors que l'infrastructure est composée de deux piles intermédiaires, une pile centrale et deux culées sous forme d'appuis simples en béton armé (Figs III.31 et III.32)



Figure III.31 Vue du tablier du pont



Figure III.32 Vue du tablier avec culée

Les caractéristiques géométriques du pont sont :

- Longueur totale : 69 m ;
- Largeur totale : 10.40 m dont deux trottoirs de 1.7 m chacun ;

- Epaisseur de la dalle du tablier : 25 cm ;
- Quatre poutres BA espacées de 1.8 m entre axes ;
- Deux travées intermédiaires de 24 m et deux consoles de 10.5 m ;

Une vue transversale de l'ouvrage en question, montre l'existence d'une dalle en béton armé, qui est surmontée de poutres, au nombre de quatre (04), avec un espacement équidistant. Deux trottoirs identiques aux extrémités (bords) avec deux glissières de sécurité. Le détail de la géométrie est illustré dans la figure III.33.

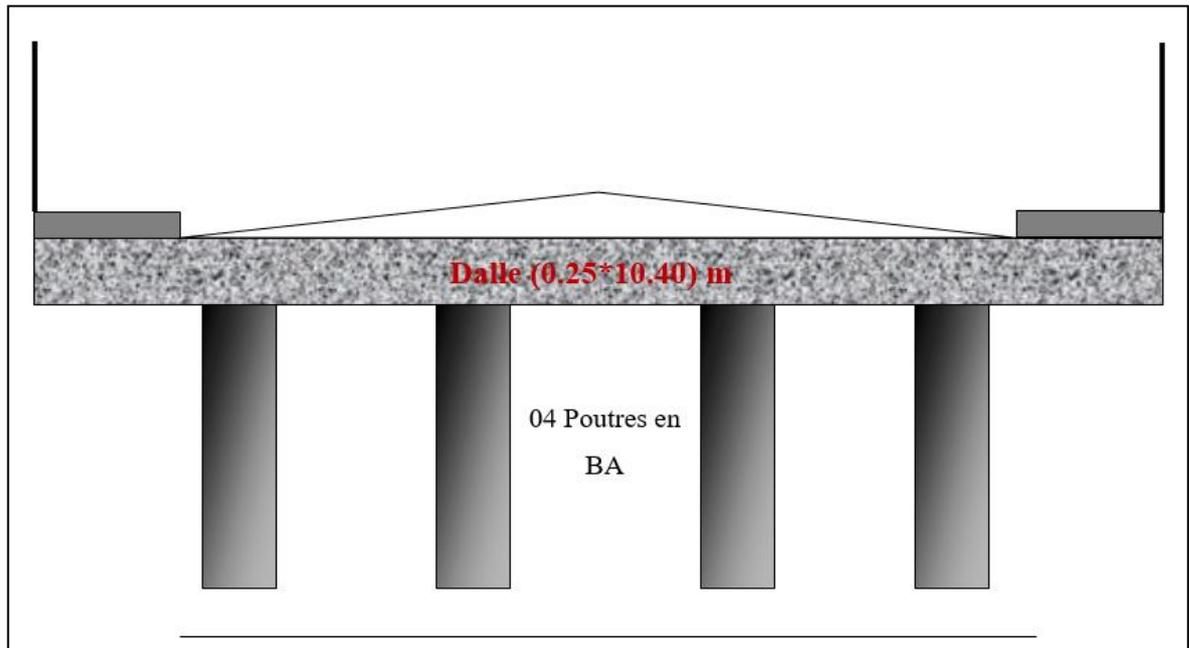


Figure III.33 Géométrie du tablier du pont dans le sens transversal.

Pour le sens longitudinal (Fig.III.34), le pont sur oued Hachem, est composé de 4 travées non identiques (deux intermédiaires de 24 m et deux consoles de 10.5 m). On constate trois piles (appuis intermédiaires) et deux sommiers (aux extrémités)

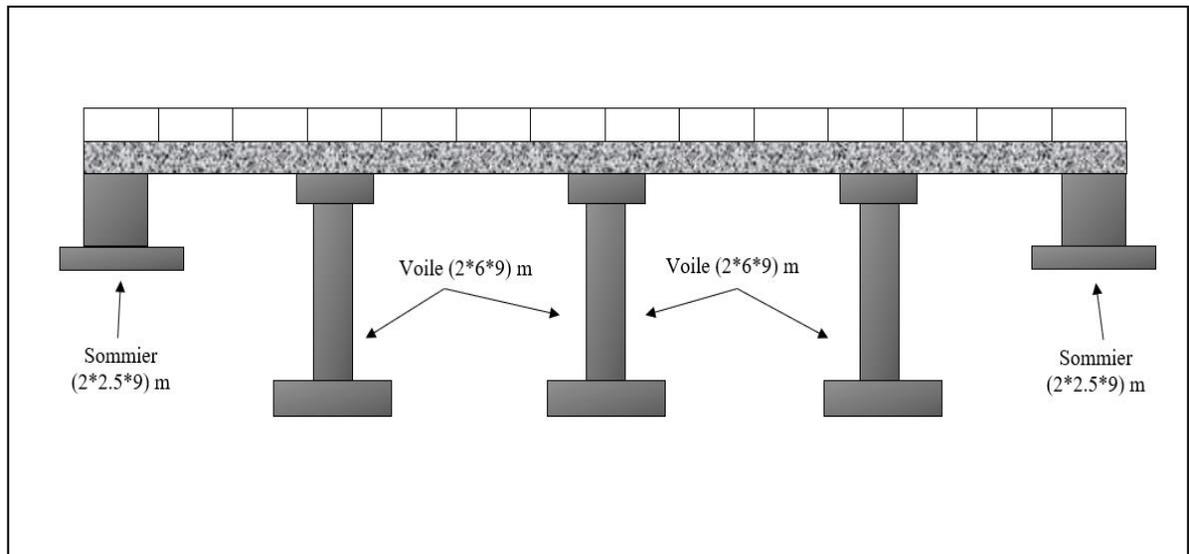


Figure III.34 Vue du pont dans le sens longitudinal

### III.4.3.3 Modélisation du cas d'étude

Afin de suivre le comportement dynamique de l'ouvrage en question, avant et après renforcement par composites, avec insertion des nanotubes CNTs, On a procédé à sa modélisation, en utilisant le logiciel ANSYS APDL, tout en gardant les mêmes choix des éléments de la bibliothèque du logiciel Ansys, que ceux utilisés pour modélisation des matériaux des cas précédents (éprouvettes et poutres), avec les mêmes principes du modèle EF. Les modèles choisis, dans l'analyse numérique, sont donnés par les figures III.35 à III.39.

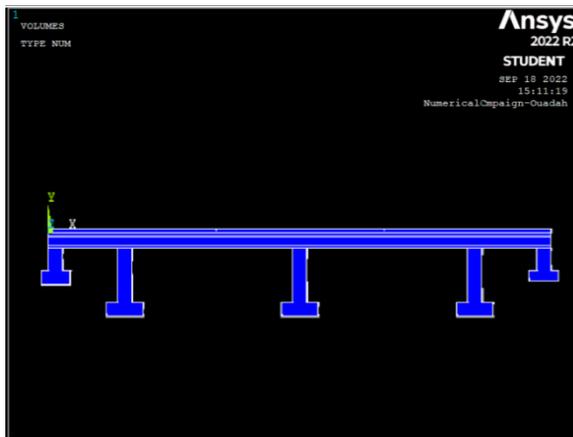


Figure III.35 Modèle sens longitudinal

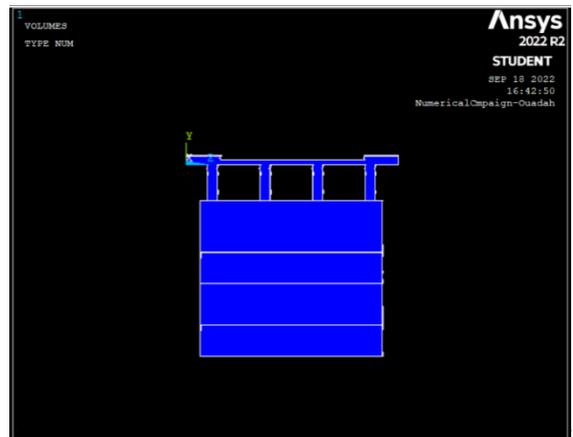


Figure III.36 Modèle sens transversal

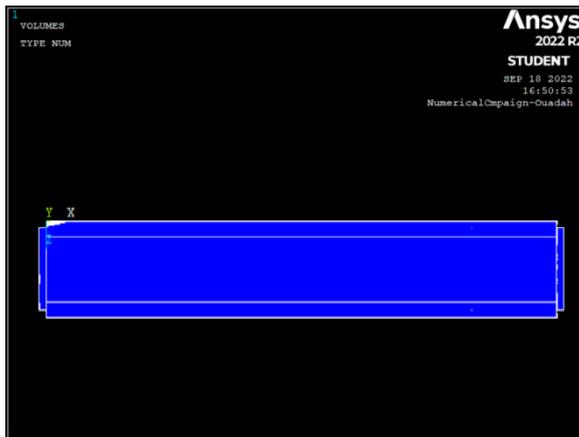


Figure III.37 Modèle vu de haut

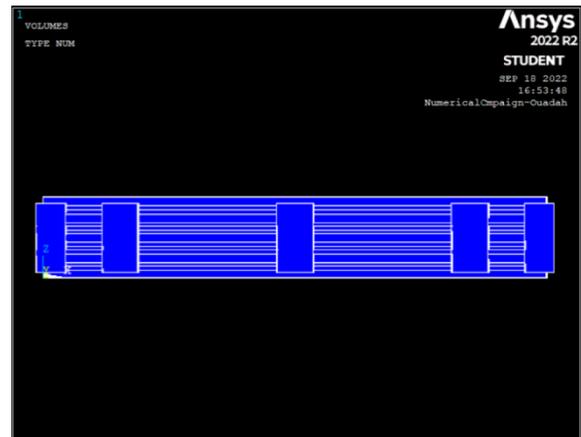
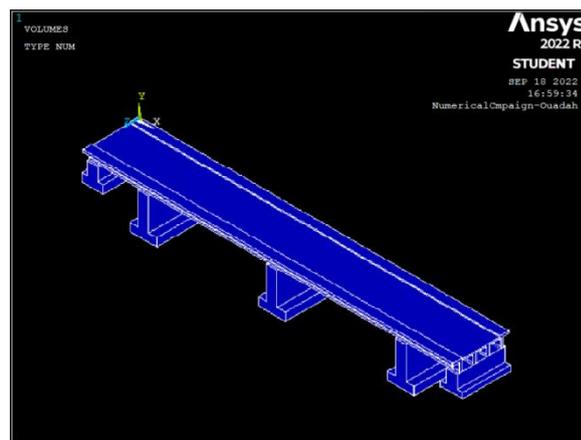


Figure III.38 Modèle vue de bas



III.39 Vue en perspective du pont

Le maillage choisi est un maillage en éléments cubiques de 500 mm de côté, c'est bien le maillage le plus raffiné possible en vue des restrictions de la version étudiant de ANSYS dans le nombre maximal de nœuds possible (moins de 32 000 nœuds). Le nombre d'éléments, le nombre de nœuds, ainsi que le maillage résultant sont présentés dans les tableaux III.7 et III.8.

Tableau III.8: Nombre de nœuds du modèle choisi

Détails	Nombre de noeuds			
	Béton Armé	Renforts	Résine époxydique	Nombre totale
Sans renforcement	21 521	/	/	21 521
Renforcement par composites traditionnels	21 521	4 031	4 031	29 583
Renforcement par composites + nano tubes CNTs	21 521	4 031	4 031	29 583

Tableau III.9. Nombre d'éléments du modèle choisi

Cas de modélisation	Nombre d'éléments
Sans renforcement	13 213
Renforcement par composites traditionnels	18 738
Renforcement par composites + nano tubes CNTs	18 738



Figure III.40 Maillage du pont

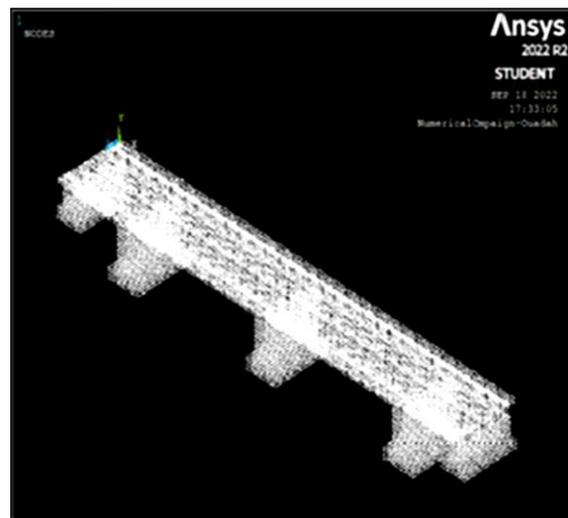


Figure III.41 Discretisation et création des nœuds

Les conditions aux limites choisies pour les trois modèles réalisés, sont identiques, soit un encastrement au niveau des fondations où blocage des déplacements dans les trois directions  $ox$ ,  $oy$  et  $oz$  (Fig.III.42).

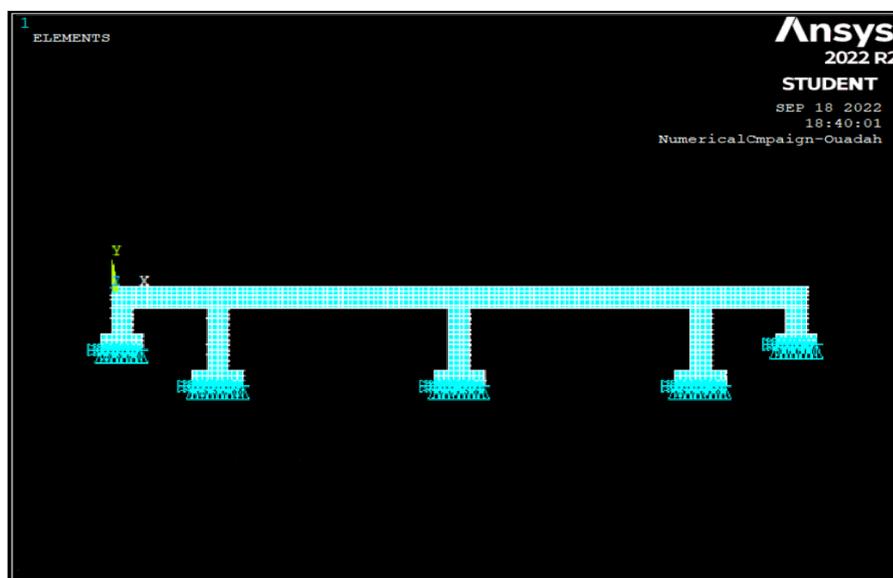


Figure III.42 Conditions aux limites du modèle EF.

En plus des Lamelles Sika Carbodur, utilisées dans la partie tendue des poutres, le renforcement par composites du pont consiste à ajouter du tissu Sika Wrap (mondirectionnel) avec sa colle époxy Sikadur 30 colle. Un pourcentage fixe de 2% en poids des nano-composites, dans la résine époxy est pris dans toute la modélisation. Avec un tel pourcentage, une augmentation du module d'élasticité pouvant atteindre les 214% est observée, selon Liu et al [124]. Le tableau III.9, récapitule les propriétés des différents matériaux composites utilisés dans cette modélisation.

Tableau III.10 Différentes propriétés des composites utilisés

	Sika Carbodur S1012	Sikadur 30 colle	Sika Wrap 600C	Sikadur 300 colle
<b>Matériaux composites traditionnels</b>				
<b>Module d'élasticité E (MPa)</b>	170 000	9 600	235 000	2 800
<b>Coefficient/ Poisson <math>\nu</math></b>	0.3	0.4	0.3	0.4
<b>Nano Composites (CNTs)</b>				
<b>Module d'élasticité E (MPa)</b>	/	30 144	/	8 792
<b>Coefficient/ Poisson <math>\nu</math></b>	/	0.4	/	0.4

L'emplacement des plaques Sika carbodur, a été fait selon l'expérimentation adoptée, en étalant tout d'abord la colle (résine époxydique) (Fig. III.43). La figure III.44, montre la disposition des plaques stratifiées Sika carbodur au niveau de la nappe inférieure de chaque poutre du tablier de l'ouvrage.

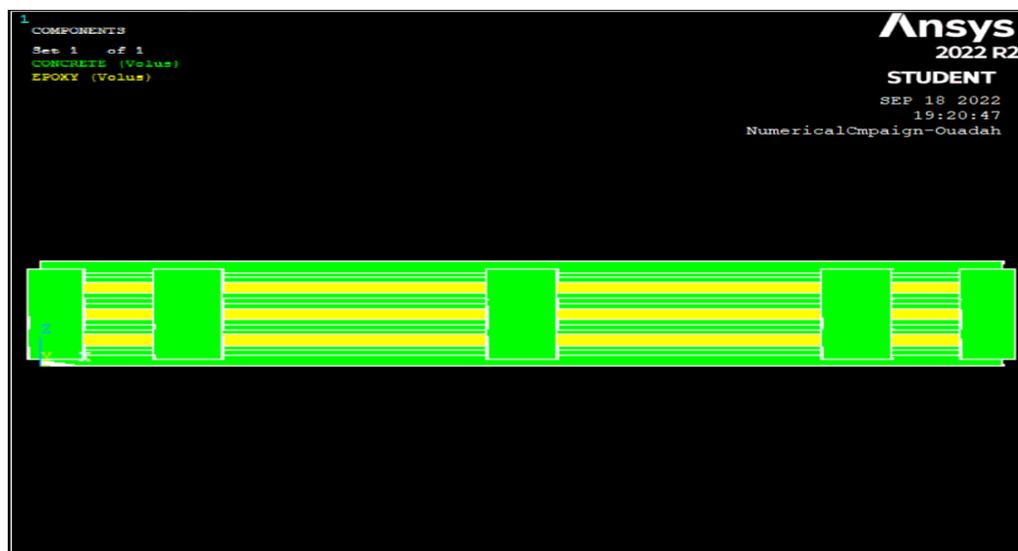


Figure III.43 Placement de la résine sous poutres de pont

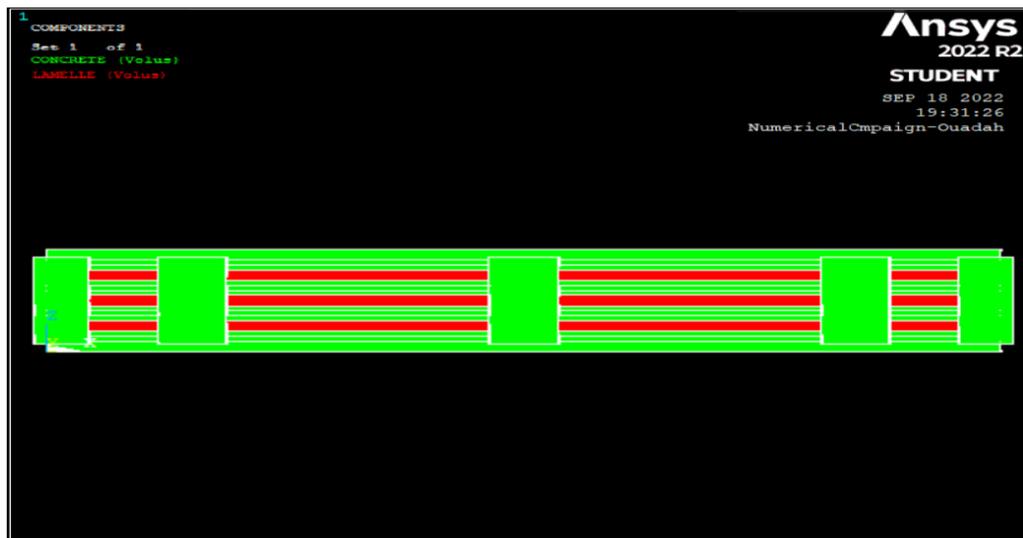


Figure III.44 Placement des plaques Sika carbodur sous poutres de pont

Concernant le tissu Sikawrap (en rouleaux), travaillant au cisaillement, l'emplacement a été effectué au niveau des deux faces de l'âme de chaque poutre (au nombre de quatre) et ce, après étalage de la résine Sikadur300 colle (Fig. III.45). La figure III.46, montre la disposition du tissu sikawrap dans les deux faces de l'âme de chaque poutre.

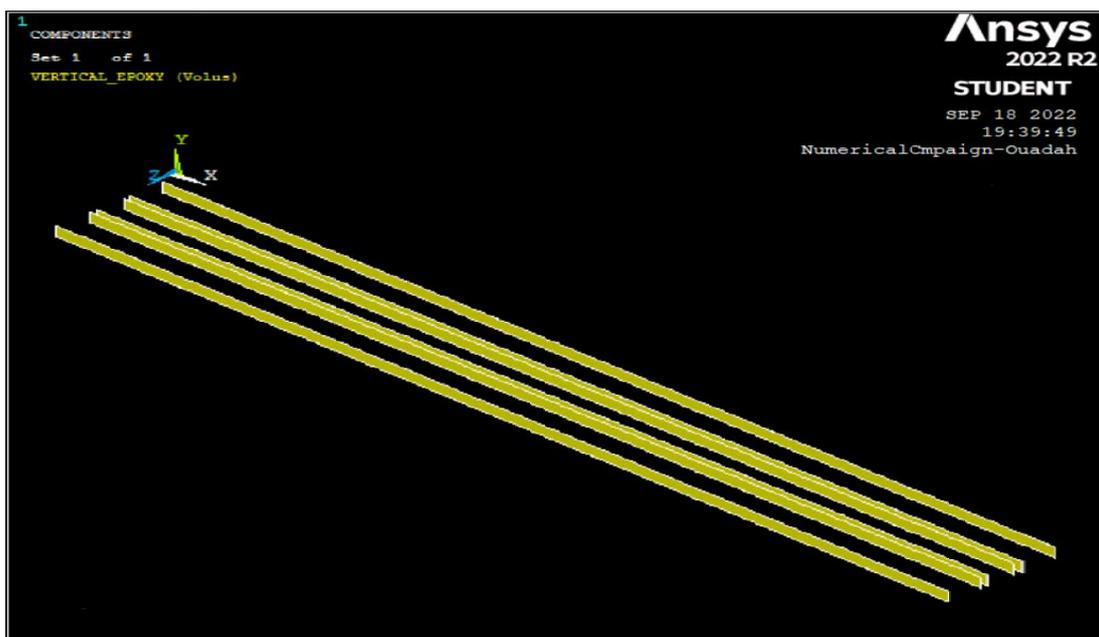


Figure III.45 Emplacement de la résine Sikadur 300 colle.

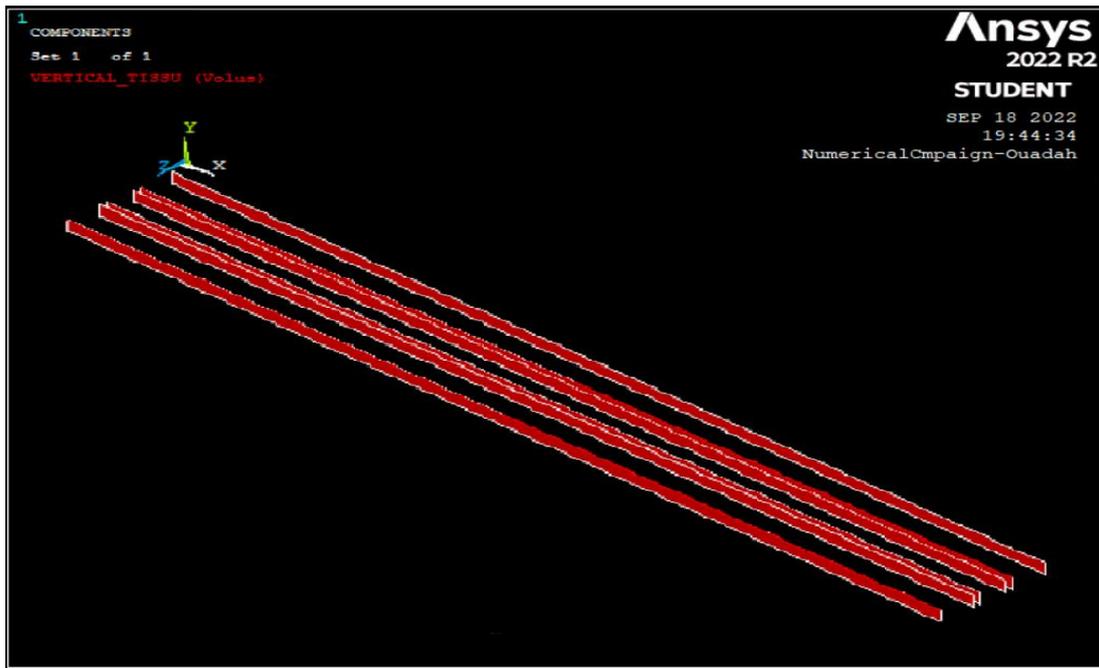


Figure III.46 Emplacement des tissus Sikawrap monodirectionnel

Notons que les modélisations ont été faites, en supposant que l'adhérence est parfaite entre le support et la colle (résine/interface) et le glissement est négligeable.

La discussion et les commentaires des valeurs trouvées dans les résultats seront abordés dans le chapitre suivant (Discussion et commentaires).

**CHAPITRE IV :**  
**RESULTATS ET DISCUSSIONS**

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente une analyse et une discussion des résultats des différents essais effectués en laboratoire sur les éprouvettes (spécimens d'essais) en forme de poutres en béton armé renforcées et/ou réparées par des composites avec les différents pourcentages adoptés des CNT's, ainsi que celles de la modélisation numérique des poutres d'essai, poutres à échelle réelle et de l'étude du comportement dynamique du pont pris pour cas d'étude.

### IV.2 Résultats des essais en laboratoire

Cette partie est dédiée aux résultats des essais sur éprouvettes, poutres témoins et poutres renforcées et réparées par des composites modifiés, où nous remarquons que le comportement des poutres est toujours caractérisé par trois phases distinctes :

- Une phase élastique avant apparition des fissures ;
- Une phase plastique où l'apparition et développement des fissures ;
- Une phase de rupture

#### IV.2.1 Essai d'adhérence "Pull Off Test"

Les résultats de de l'essai Pull-Off sont présentés dans le tableau IV.1 et la figure IV.1.

Tableau IV.1 : Récapitulatif des résultats de l'essai Pull-Off.

	Force (kN)	Force Moyenne (kN)	Contrainte (Mpa)	Contrainte Moyenne (Mpa)	Mode de rupture
<b>CFRP 0%</b>	1,42	1,66	0,72	0,84	Support (béton)
	1,84		0,93		Support (béton)
	1,72		0,86		Support (béton)
<b>CFRP 0,5%</b>	2,47	2,12	1,25	1,08	Support (béton)
	2,27		1,15		Support (béton)
	1,63		0,83		Support (béton)
<b>CFRP 1%</b>	3,51	2,62	1,81	1,34	Support (béton)
	2,87		1,45		Support (béton)
	1,48		0,75		Support (béton)
<b>CFRP 1,5%</b>	2,77	2,79	1,40	1,42	Support (béton)
	3,19		1,624		Support (béton)
	2,43		1,23		Support (béton)

<b>CFRP 2%</b>	4,13	3,08	2,10	1,56	Support (béton)
	3,21		1,63		Support (béton)
	1,90		0,96		Support (béton)

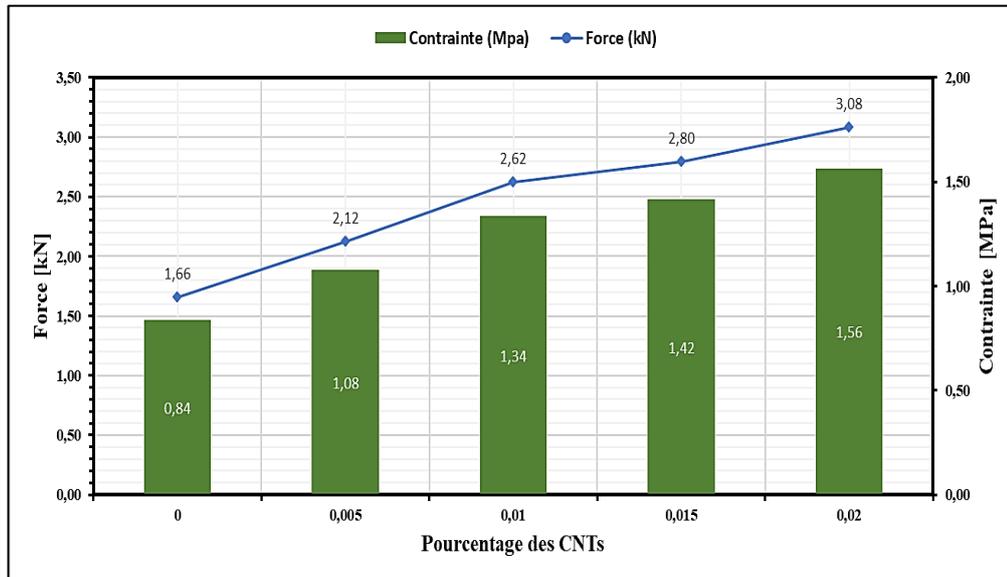


Figure IV.1 : Résultats de l'essai Pull-Off : Force et contrainte d'adhérence.

Ces résultats ont montré une amélioration de la force d'adhérence entre les lamelles composites et le support en béton pour chaque pourcentage de CNT's ajouté, soit un gain de l'ordre de 28%, 57.76%, 68.50% et 85.73% pour les résines améliorées par 0.5%, 1%, 1.5% et 2% de CNT's respectivement. A noter que dans tous les cas de figure, la rupture se fait dans le support (Béton).

## IV.2.2 Essai de Flexion sur les poutres en BA

### IV.2.2.1 Poutres de référence

#### i. Diagramme Charge – Déformation

La courbe Charge – déformation de la poutre Contrôle « PC » mesurée à mi travée et représentée dans la Figure IV-2, où nous constatons que durant la première phase de « béton armé non fissuré » qui s'étend à 65 kN avec une flèche d'environ 0.05 mm le comportement est linéaire, avec apparition des fissures verticales fines ascendantes dues au moment fléchissant qui apparaissent à 46.5 kN.

Dans la deuxième phase linéaire – parabole de « béton armé fissuré » des fissures inclinées à 45° allant des appuis jusqu'aux points d'application de la charge apparaissent à 65 kN, ces dernières sont dues aux efforts tranchants appliqués sur la poutre. La flèche mesurée est de l'ordre de 0.10 mm.

La phase « béton armé fissuré » est la phase plastique du béton armé où on constate la plastification des aciers et l'augmentation de la profondeur et la propagation des fissures inclinées jusqu'à la rupture par cisaillement à une charge de 84.3 kN et une flèche maximale de 0.99 mm.

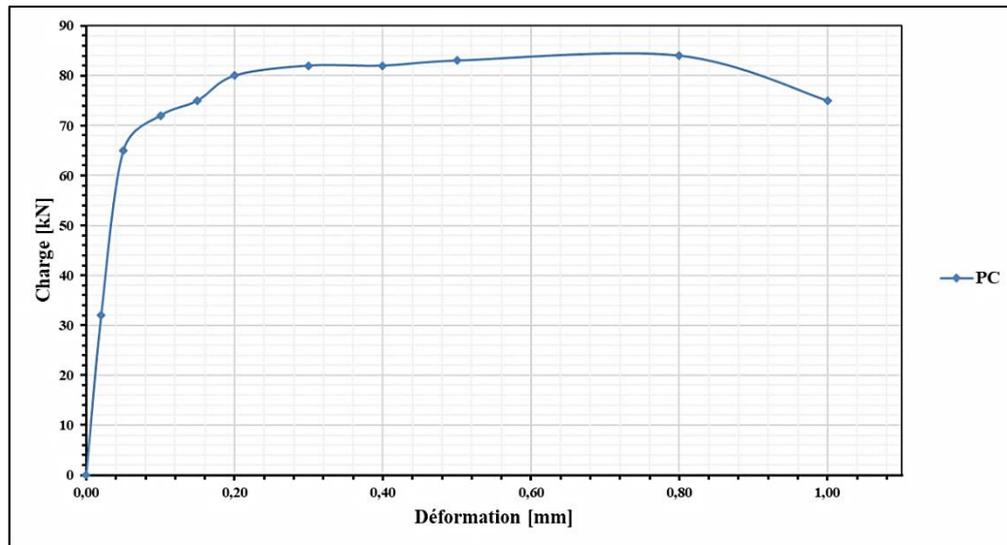


Figure IV.2 : Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre de référence "PC".

### ii. Evolution des fissures

La fissuration des poutres de contrôle « PC » est bien présentée schématiquement sur la figure IV.3, où on peut bien distinguer l'accroissement en nombre, en longueur et en largeur des fissures jusqu'à rupture.

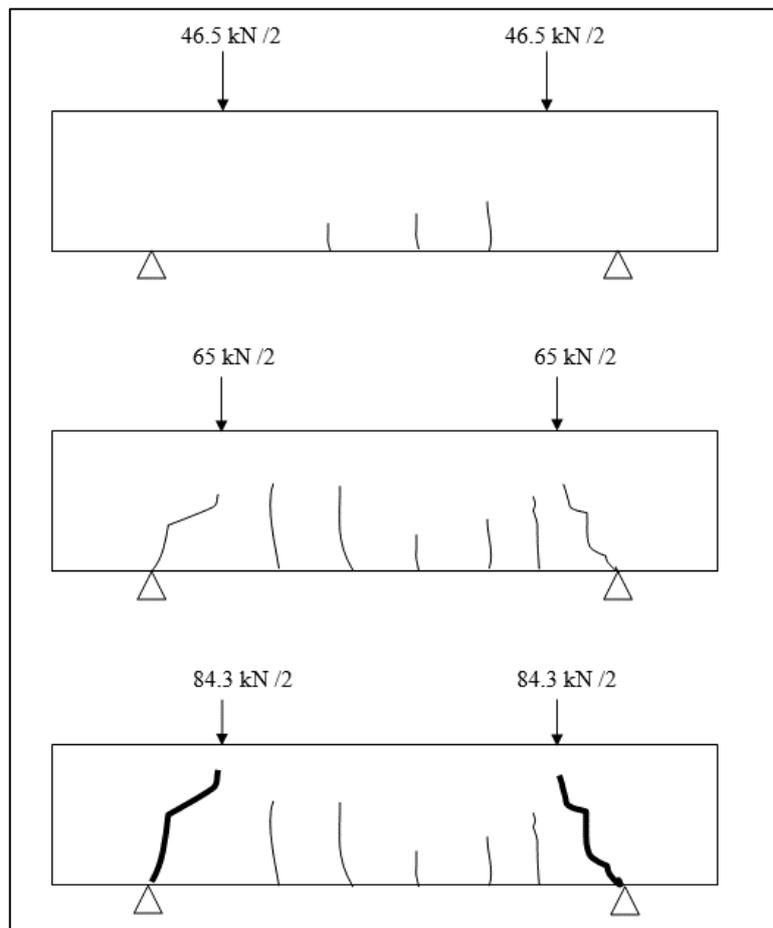


Figure IV.3 Evolution des fissures pour les poutres de contrôle "PC".

### IV.2.2.2 Poutres renforcées avant endommagement

Les résultats de cette partie seront discutés pour chaque pourcentage de CNT's ajouté au composite en faisant une comparaison avec les poutres renforcées par composite classique ainsi que les poutres de contrôle.

#### i. Poutre renforcée par composite classique « PR1-0 »

Dans le cas de renforcement par matériaux composites placés dans la zone tendue de la poutre, aucune fissure n'apparaît dans la première phase et le comportement de la poutre est linéaire. Au cours de la deuxième phase on remarque l'apparition des fissures inclinées sur les deux côtés à 73.4 kN qui se propagent en longueur et en profondeur sans apparition des fissures verticales (les efforts de traction sont repris par les lamelles CFRP).

La rupture se produit dans la phase du béton armé plastique par cisaillement du support (béton armé) à 90 kN avec une flèche maximale de 1.17 mm, soit un gain en termes de portance de 7.14% par rapport à la poutre de contrôle « PC ».

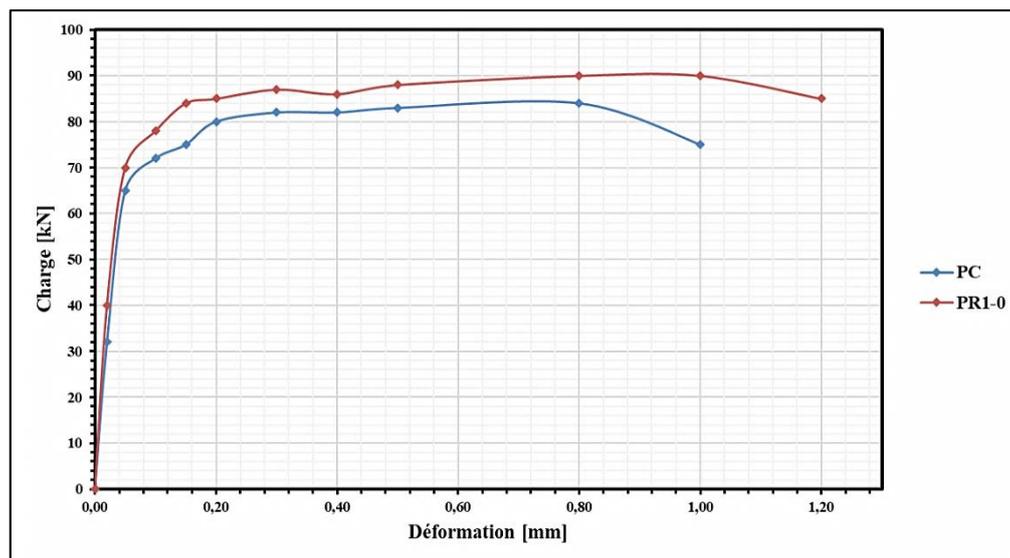


Figure IV.4 Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-0" en comparaison avec celle de la poutre de référence "PC".

#### ii. Poutre renforcée par composite amélioré avec 0.5% CNT's « PR1-0.5 »

L'ajout des CNT's n'affecte pas le comportement linéaire du béton dans la phase élastique où aucune fissure n'est observée. L'apparition des fissures inclinées sur les deux côtés est remarquée durant la phase du béton armé fissuré sous une charge de 81.2 kN, ces derniers se propagent à partir des appuis vers les points d'application de la charge avec un angle de 45°.

La rupture se produit dans la phase du béton armé plastique par cisaillement à 134.8 kN avec une flèche maximale de 1.18 mm, soit un gain en termes de portance de 50% par rapport à la poutre renforcée par composites classiques et un gain de 60.71% par rapport à la poutre de contrôle « PC ».

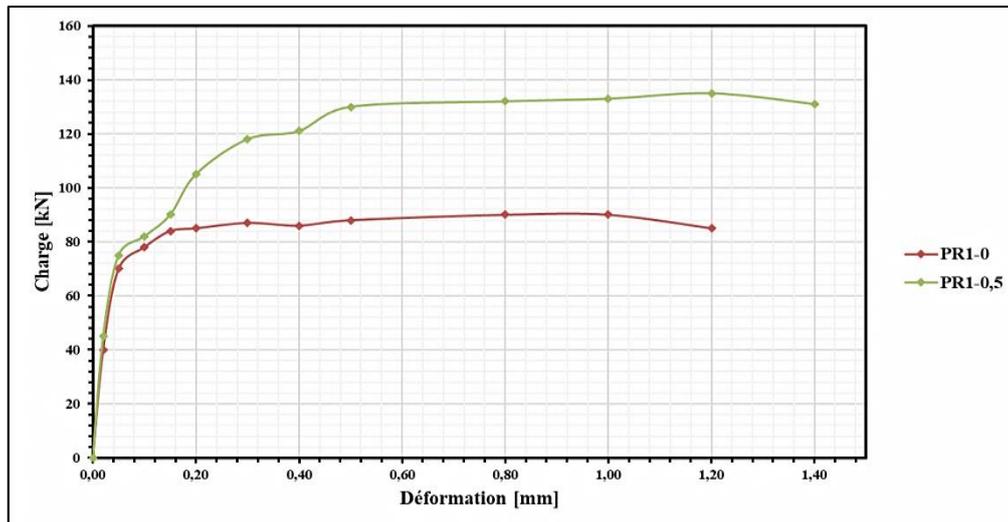


Figure IV.5 Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-0,5" en comparaison avec celle de la poutre "PR1-0".

### iii. Poutre renforcée par composite amélioré avec 1% CNT's « PR1-1 »

De même manière que précédemment, la poutre reste presque intacte durant la première phase sans apparition des fissures. Le même comportement est observé pour la deuxième phase avec apparition des fissures inclinés dues au cisaillement du béton à 87.4 kN et leur propagation à partir des appuis aux points de chargement avec un angle de 45°.

La rupture se prononce à 157.6 kN après éclatement du béton sans aucun arrachement des lamelles CFRP, et la flèche atteint une valeur de 1.24 mm. Le gain apporté par l'incorporation de 1% des CNT's dans la résine est de 75.65% par rapport à la poutre avec renforcement classique « PR1-0 » et de 88.10% par rapport à la poutre témoin « PC ».

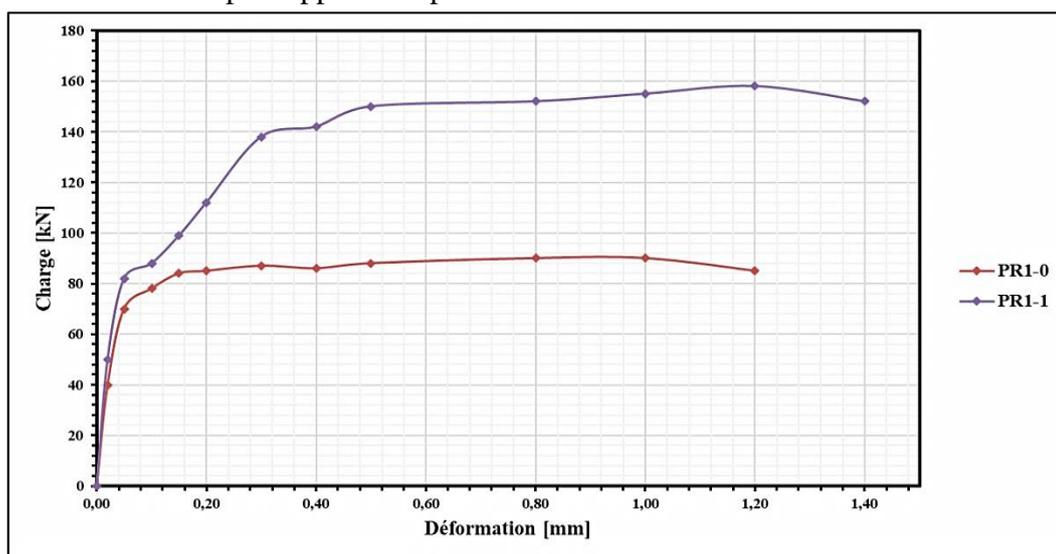


Figure IV.6 Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-1" en comparaison avec celle de la poutre "PR1-0".

### iv. Poutre renforcée par composite amélioré avec 1.5% CNT's « PR1-1.5 »

Ces poutres présentent un comportement identique que celui des poutres « PR1-1 », mais avec une augmentation de la charge d'apparition des premières fissures à 93.8 kN ainsi que celle de la rupture à 169.5 kN. Cela implique un gain de portance de l'ordre de 88.89% en comparaison

avec les poutres renforcées par composites classiques « PR1-0 », et de 102.38% par rapport aux poutres de contrôle « PC ». La flèche mesurée est de 1.34 mm.

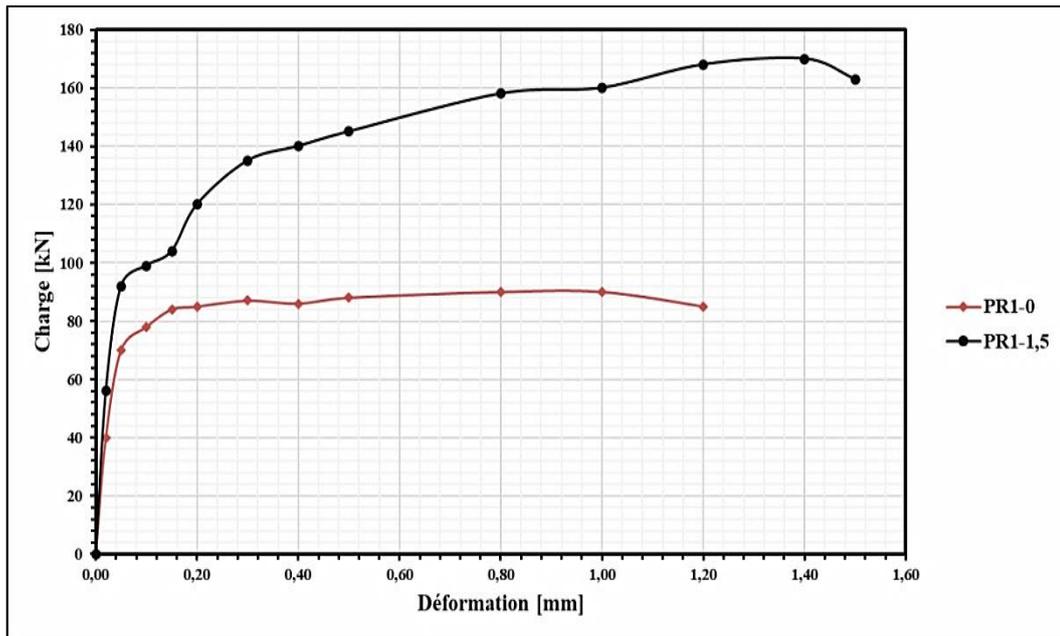


Figure IV.7: Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-1.5" en comparaison avec celle de la poutre "PR1-0".

**v. Poutre renforcée par composite amélioré avec 2% CNT's « PR1-2 »**

Pour cette série de poutres, les fissures inclinées sont apparues dans la phase « béton armé fissuré » sous une charge de 100.23 kN, et se sont propagées d'une manière identique aux séries précédentes, jusqu'à atteindre la rupture à 185.7kN avec une flèche a mi travée de 1.39 mm.

Le gain de la capacité portante de ces poutres par rapport aux poutres « PR1-0 » et « PC » exprimé en pourcentage est de 106.67% et 121.43% respectivement.

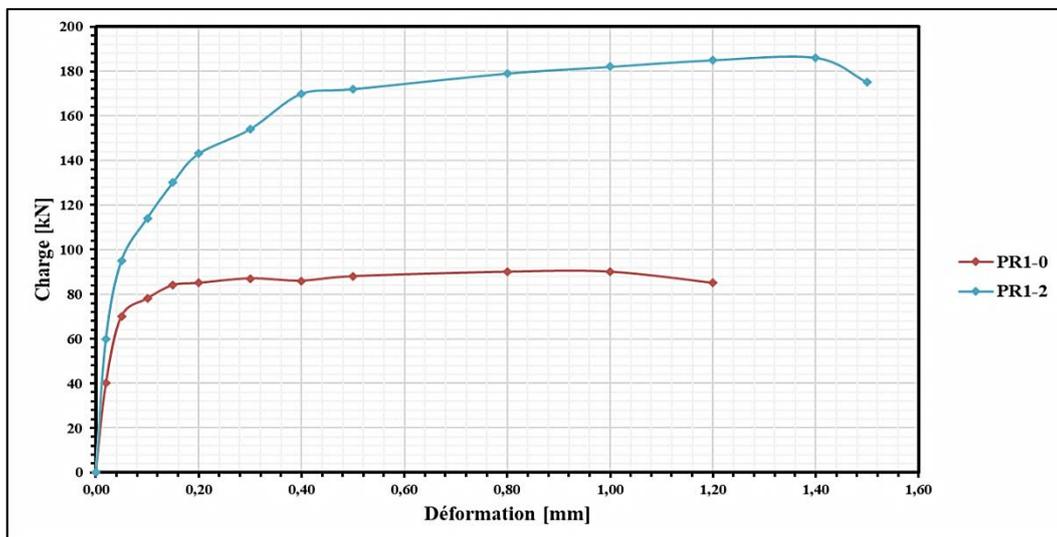


Figure IV.8 Courbe Charge - Déformation au milieu de la poutre "PR1-2" en comparaison avec celle de la poutre "PR1-0".

### vi. Comparaison de l'effet des différents pourcentages de CNT's ajoutés

Les résultats des différents diagrammes charge – déformation obtenus nous permettent de comparer l'effet de l'incorporation des nanotubes CNT's aux composites classiques afin de voir le pourcentage donnant les meilleurs résultats. La Figure IV-9 montre l'effet bénéfique des CNT's sur la capacité portante des poutres en BA avec un gain allant de 7.14% à 121.43% pour des pourcentages entre 0.5% et 2%, et de 50% à 106.67% pour les mêmes pourcentages en comparaison avec les poutres témoin sans renforcement et les poutres renforcées par composites classiques, respectivement, soit des charges à la rupture entre 134.8 kN et 184.7 kN contre une charge ultime de 84.3 kN pour les poutres témoins et 90 kN pour les poutres avec renforcement par composites classiques.

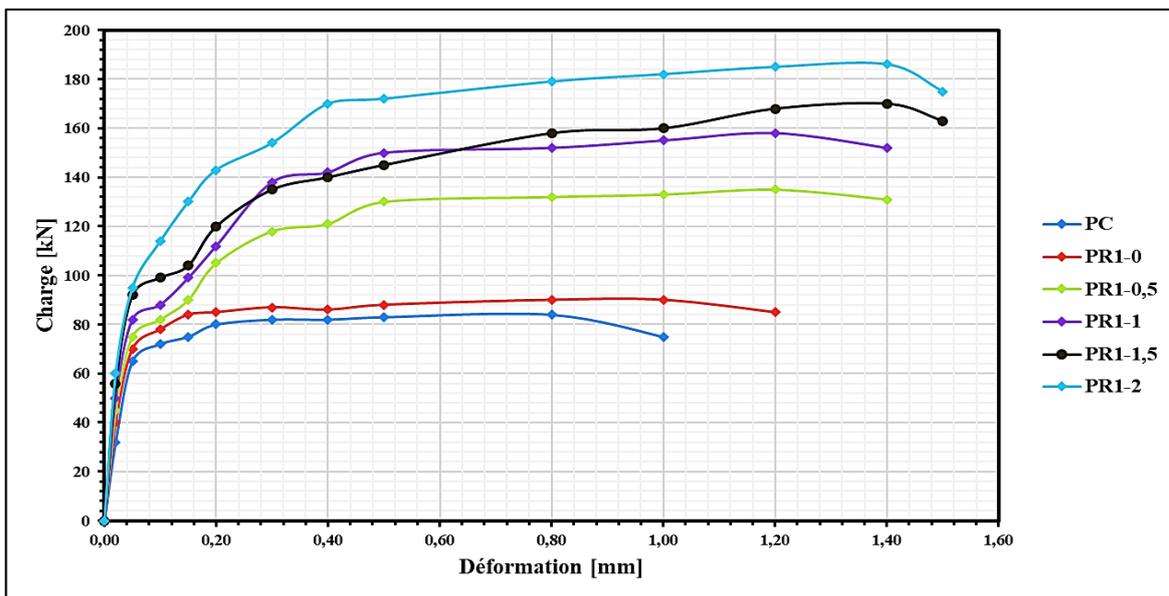


Figure IV-9 : Courbe Charge - Déformation récapitulative des différentes séries de poutres renforcées testées.

### IV.2.2.3 Poutres réparées après endommagement

Après réparation des poutres pré fissurées par injection de résine époxy et collage des composites (classiques et améliorés par CNT's), on remarque que ces réparations ont contribué à donner à la poutre une capacité portante comparable (parfois supérieur) à celle de la poutre avant endommagement, cela est probablement due aux propriétés mécaniques élevés de la résine époxy.

Effectivement, pour les poutres de contrôle « PC' » la charge d'apparition de la première fissure est de 52 kN et la charge ultime de rupture est à 89 kN, soit un gain de capacité portante de 5.58% par rapport à la série de poutres de contrôle sans réparation « PC ».

Les séries de poutres « PR2-0 », « PR2-0.5 », « PR2-1 », « PR2-1.5 » et « PR2-2 » ont montrés des gains de l'ordre de 14.61%, 53.93%, 79.78%, 95.51% et 112.36% en comparaison avec la série « PC' », respectivement. Or, les séries de poutres « PR2-0.5 », « PR2-1 », « PR2-1.5 » et « PR2-2 » qui sont renforcés par des composites améliorés par CNT's exposent des gains de 34.31%, 56.86%, 70.59% et 85.29% par rapport à la série « PR2-0 » renforcée par matériaux composites classiques.

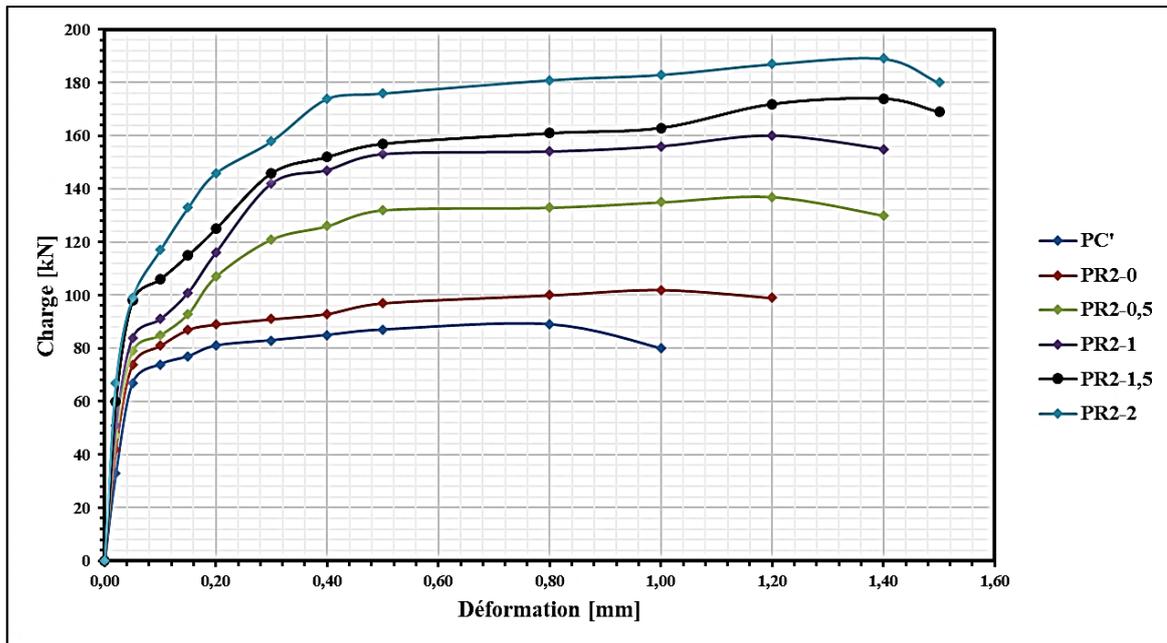


Figure IV-10 : Courbe Charge - Déformation récapitulative des différentes séries de poutres réparées testées.

Ces résultats, malgré le fait qu'ils soient légèrement inférieurs aux résultats de renforcement des poutres sans endommagement, montrent l'efficacité de l'injection des fissures par résine époxy entant que procédure de récupération de la capacité portante des éléments en BA endommagés. Les différents résultats de cette partie sont récapitulés dans le tableau IV-2 :

Tableau IV.2 Récapitulatif des résultats de réparation des poutres.

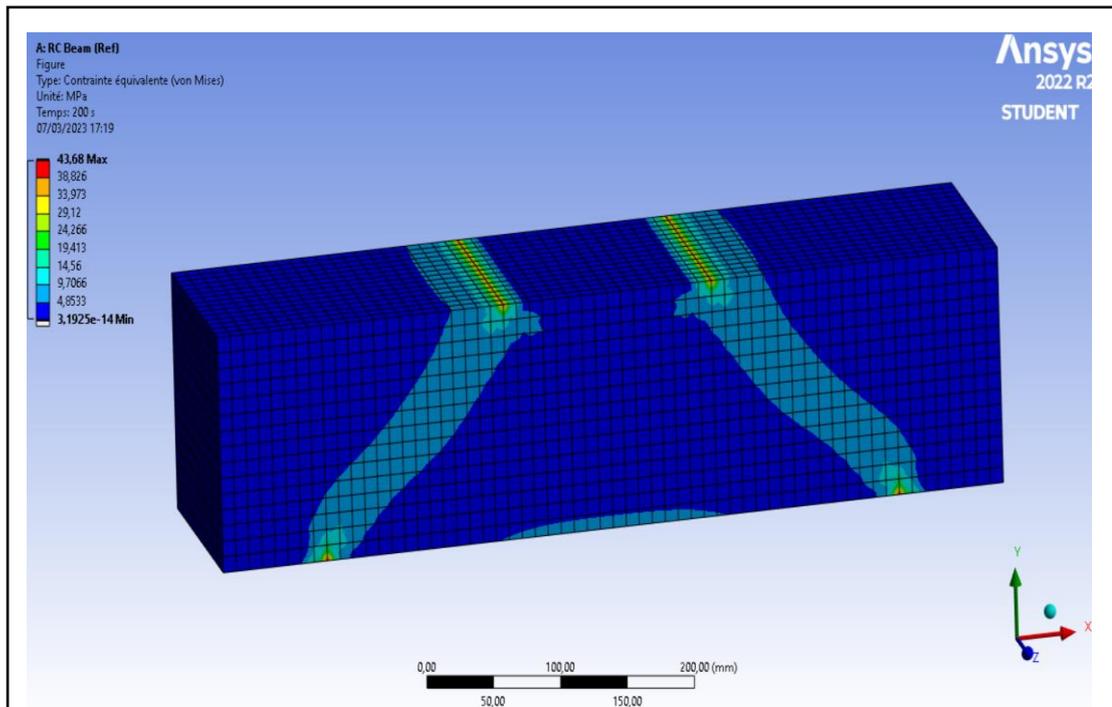
Poutres	Charge de la première fissure (kN)	Charge de rupture (kN)	Type de Fissure
PC'	52.00	89	Inclinée / 45°
PR2-0	77.30	102	Inclinée / 45°
PR2-0.5	86.42	137	Inclinée / 45°
PR2-1	92.20	160	Inclinée / 45°
PR2-1.5	101.37	174	Inclinée / 45°
PR2-2	115.70	189	Inclinée / 45°

### IV.3 Modélisation numérique des poutres d'essai

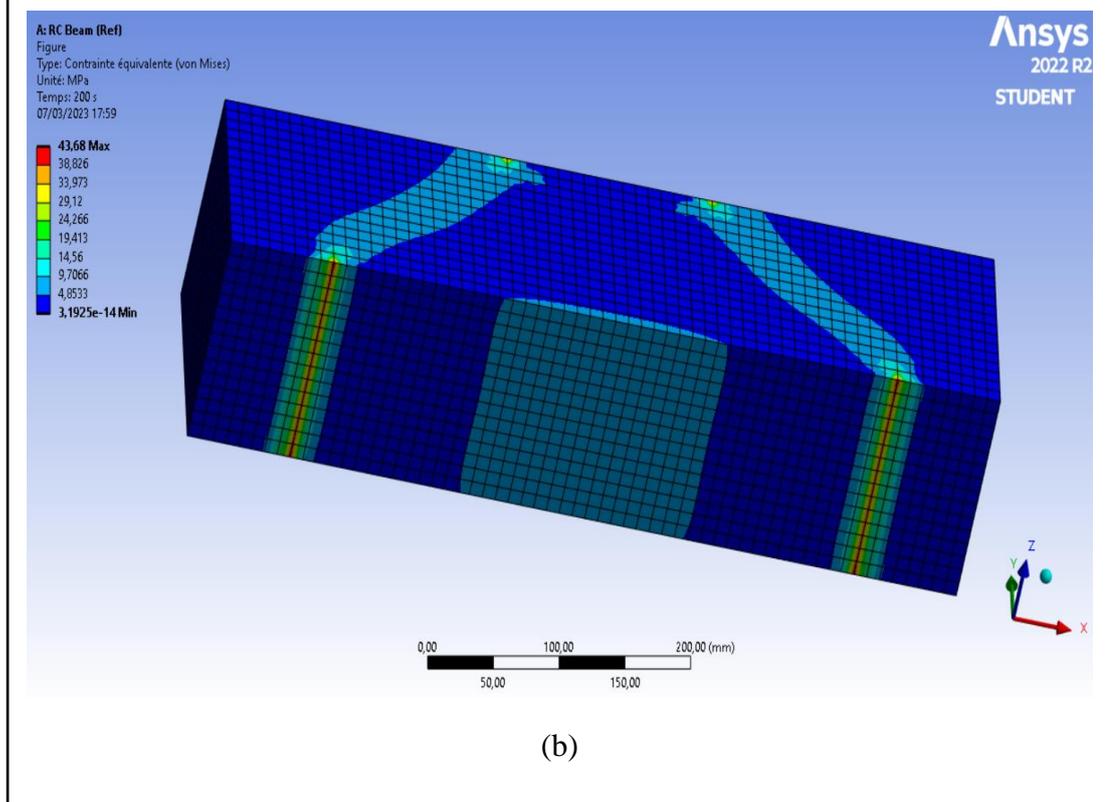
#### IV.3.1 Résultats de la modélisation

Les résultats issus de la modélisation numérique après calcul en post processeur à partir des caractéristiques mécaniques de chaque matériau et la géométrie des poutres d'essai seront présentés dans la partie suivante :

*i. Poutre de Référence « PC » :*



(a)



(b)

Figure IV.11 : Distribution des contraintes dans la poutre de référence : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.

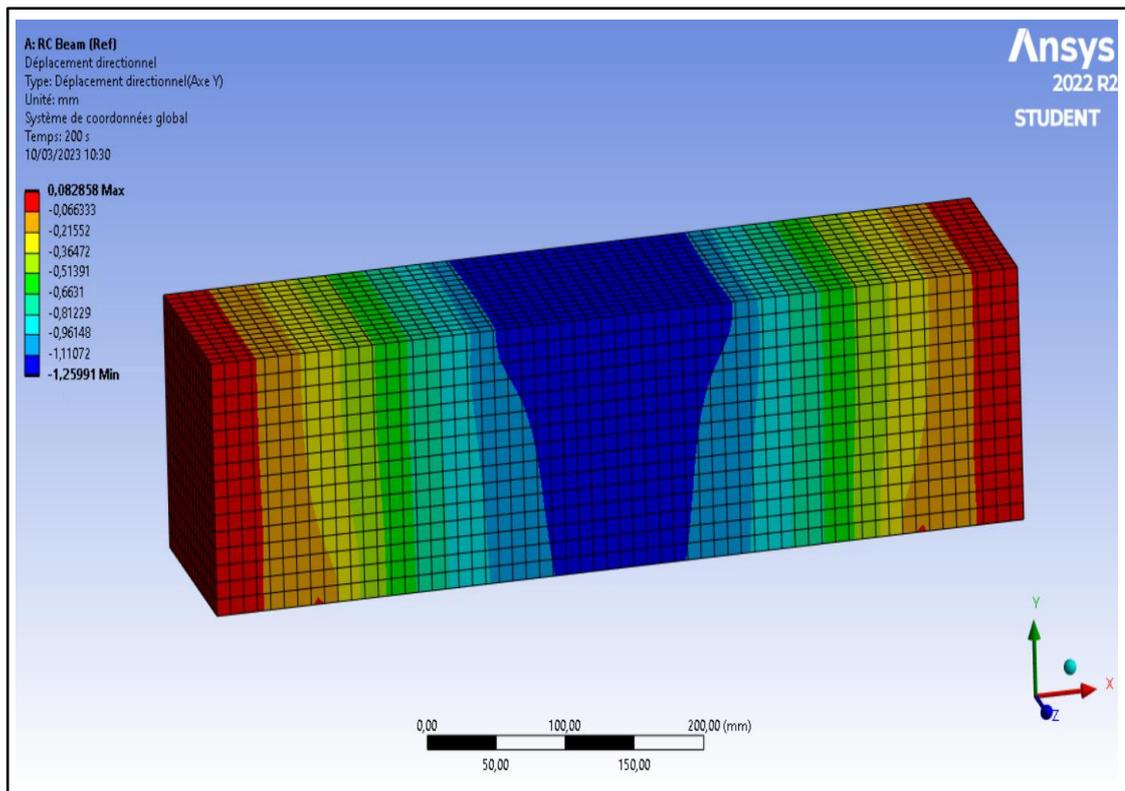


Figure IV.12 : Déplacement total de la poutre de référence.

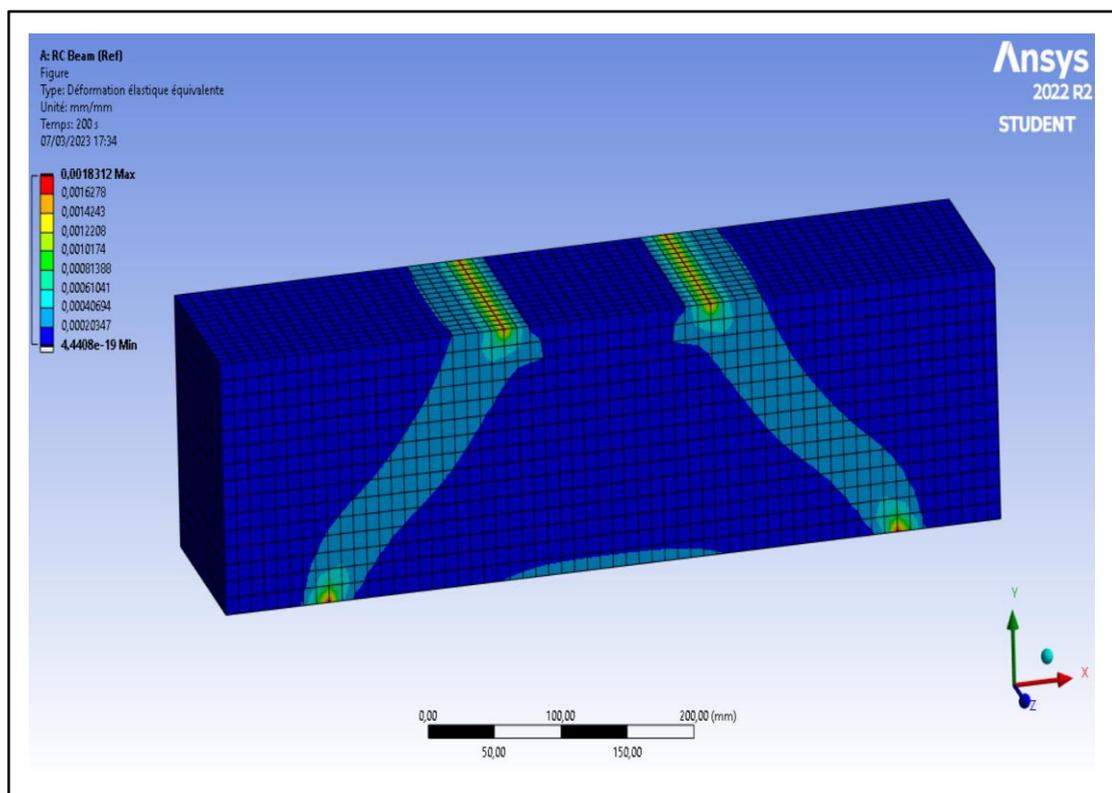


Figure IV.13 : Distribution des déformations dans la poutre de référence.

ii. *Poutre renforcée par composite classique « PRI-0 » :*

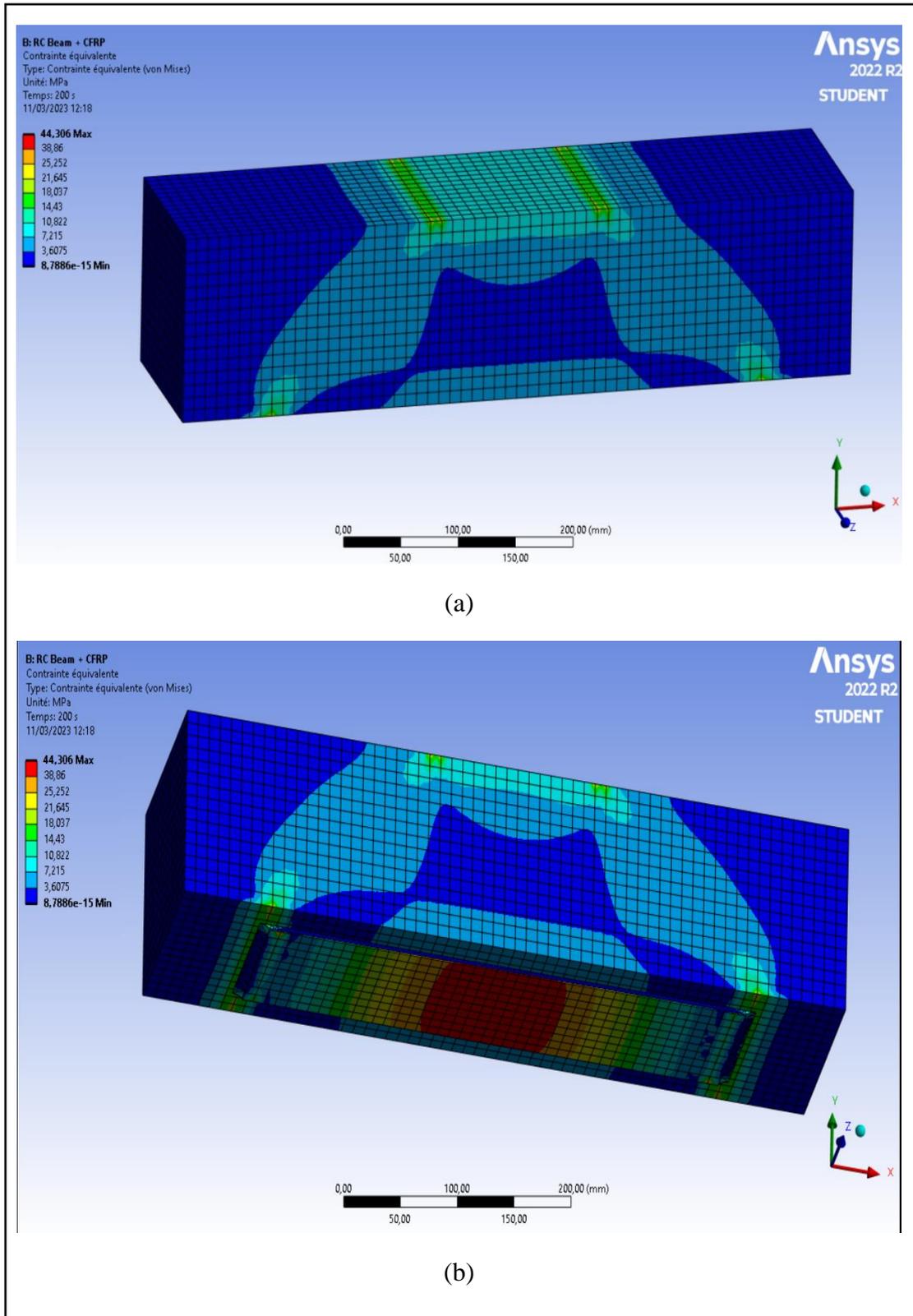


Figure IV.14 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composites classiques :  
 (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.

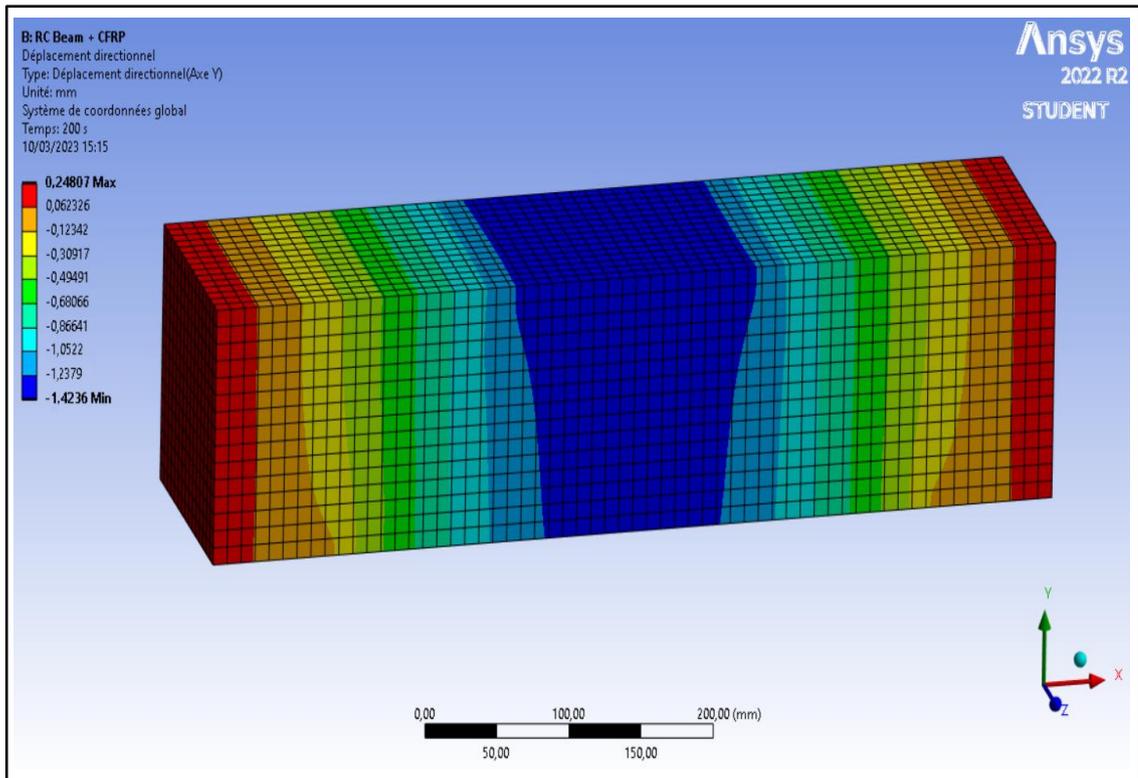


Figure IV.15 : Déplacement total de la poutre renforcée par composites classiques.

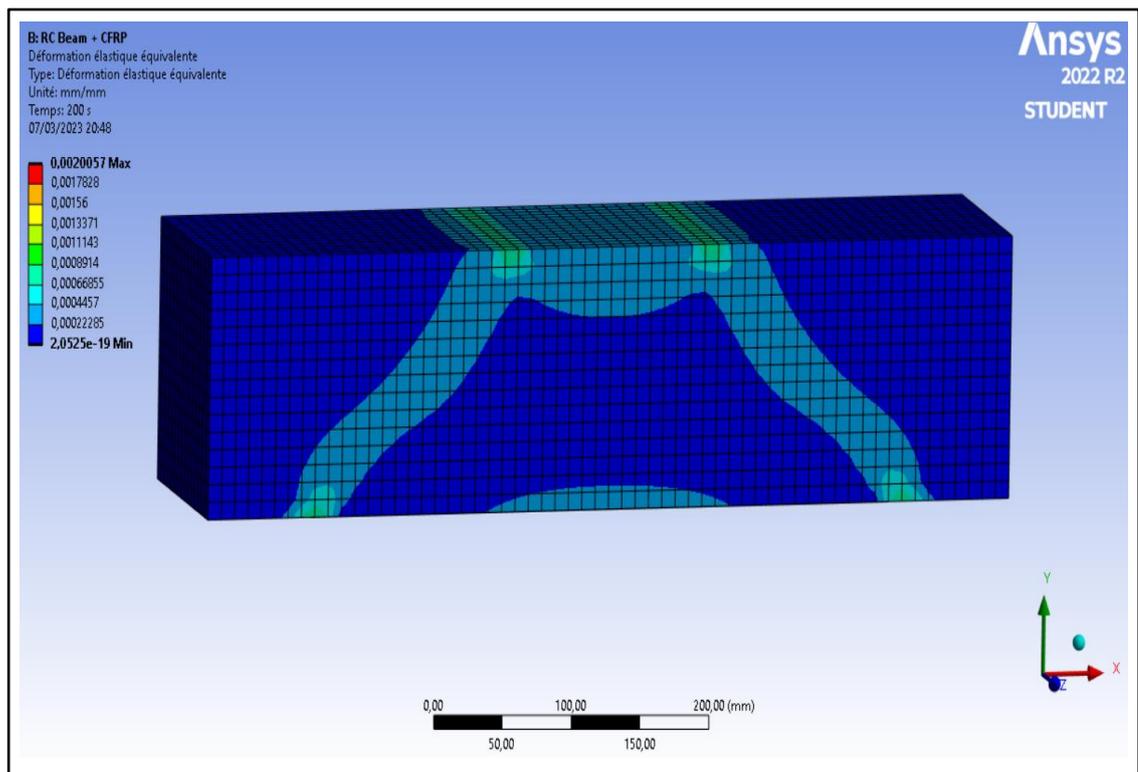


Figure IV.16 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composites classiques.

iii. *Poutre renforcée par composite amélioré avec 0.5% CNT's « PR1-0.5 » :*

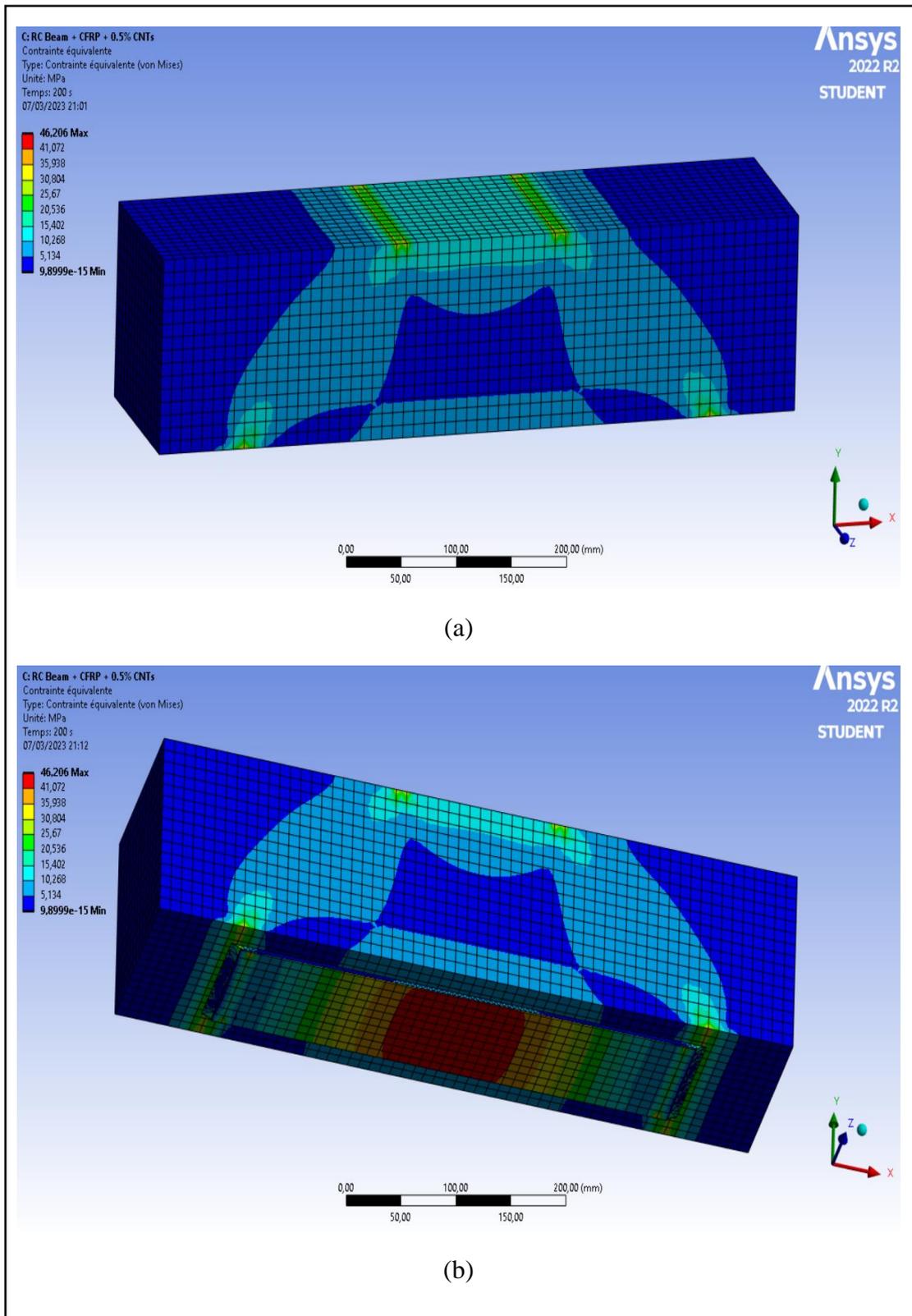


Figure IV.17 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 0.5% CNT's : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.

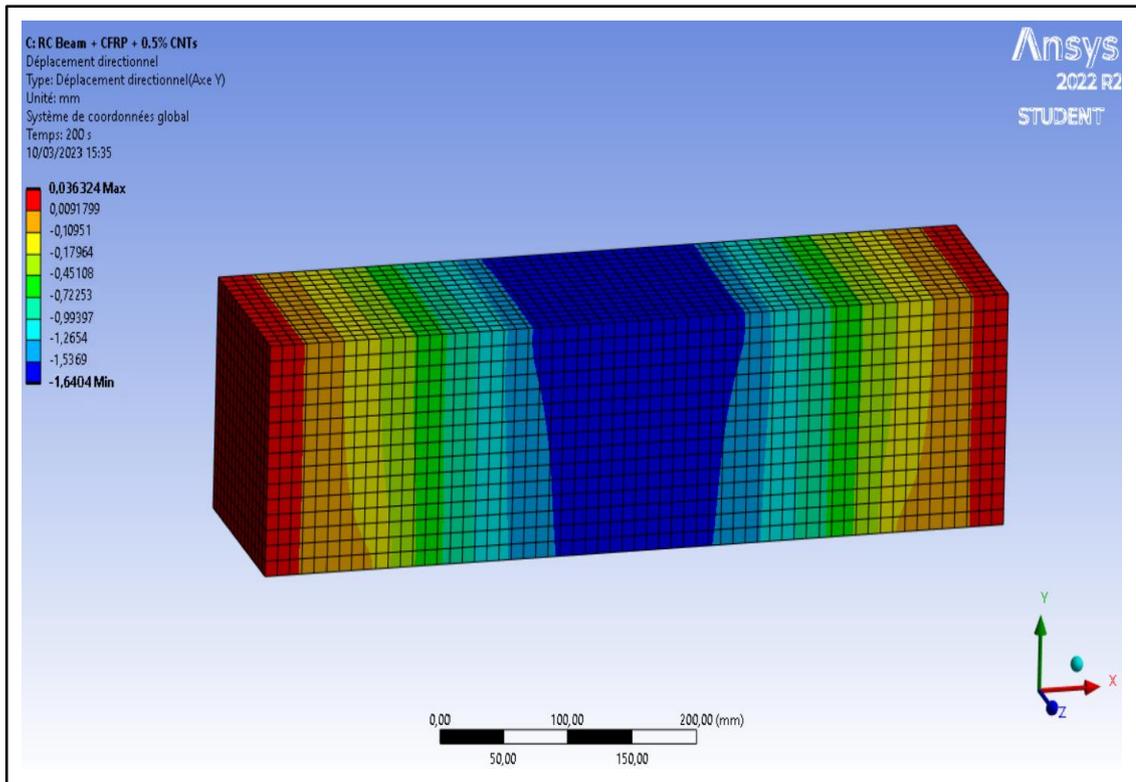


Figure IV.18 : Déplacement total de la poutre renforcée par composite amélioré avec 0.5% CNT's.

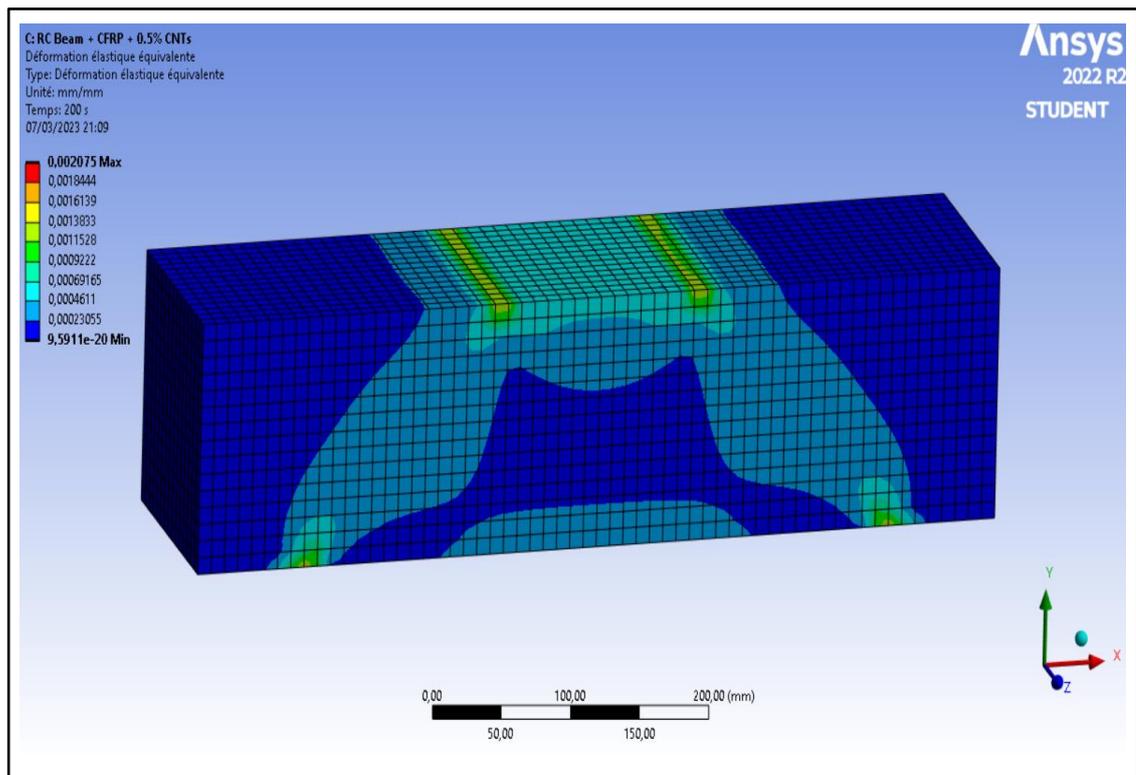


Figure IV.19 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 0.5% CNT's.

iv. *Poutre renforcée par composite amélioré avec 1% CNT's « PRI-1 » :*

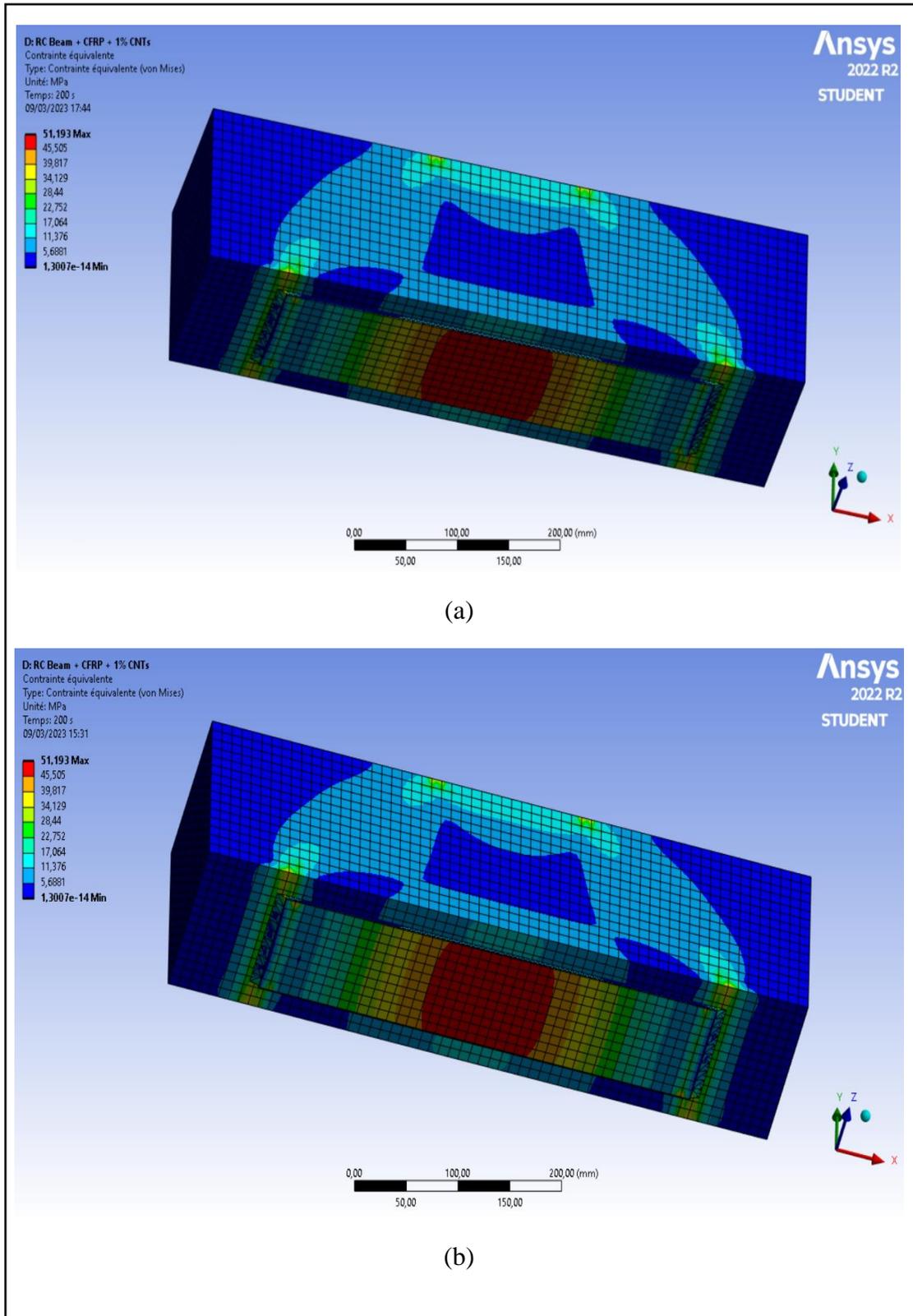


Figure IV.20 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 1% CNT's : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.

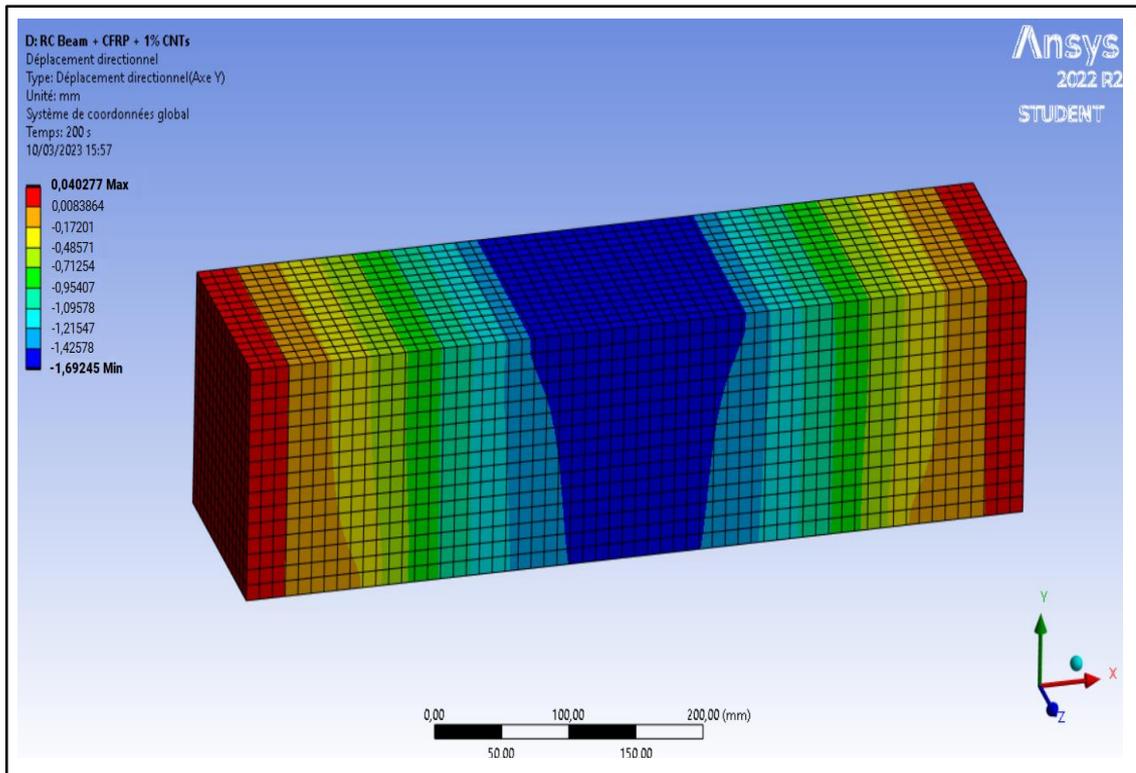


Figure IV.21 : Déplacement total de la poutre renforcée par composite amélioré avec 1% CNT's.

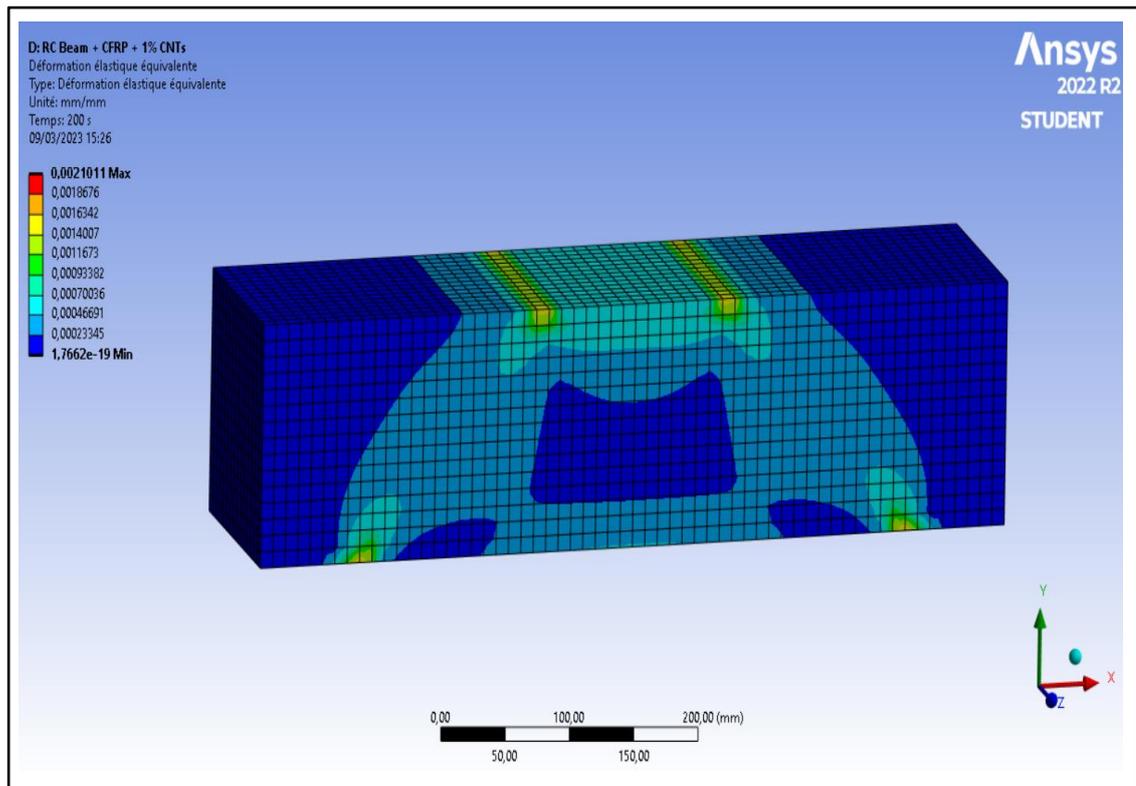


Figure IV.22 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 1% CNT's.

v. *Poutre renforcée par composite amélioré avec 1.5% CNT's « PR1-1.5 » :*

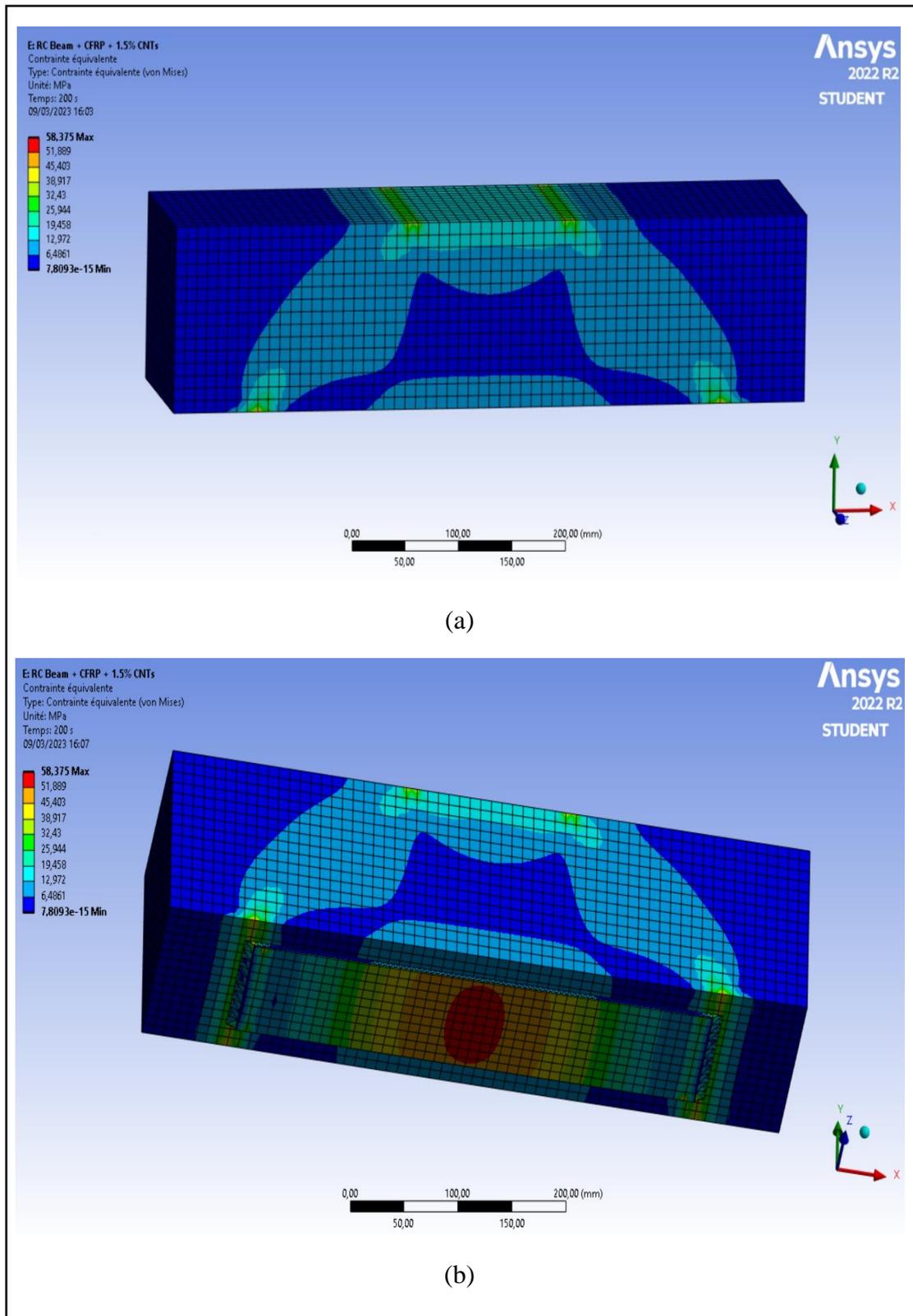


Figure IV.23 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 1.5% CNT's : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.

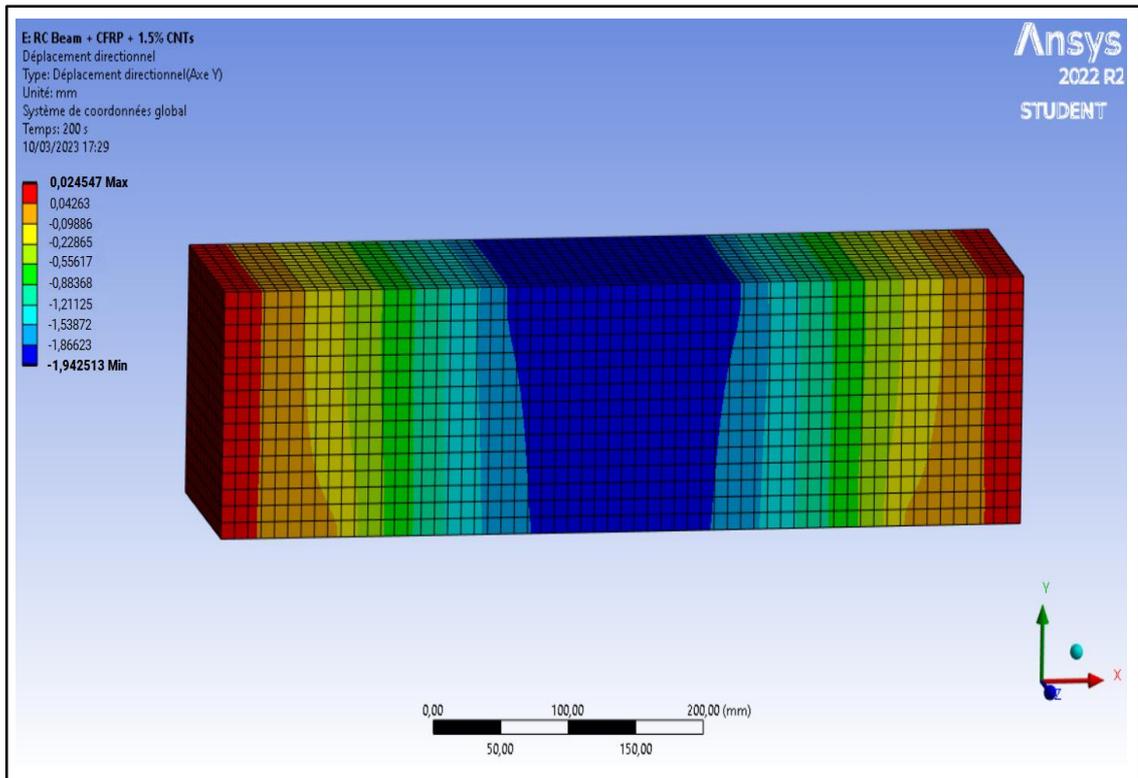


Figure IV.24 : Déplacement total de la poutre renforcée par composite amélioré avec 1.5% CNT's.

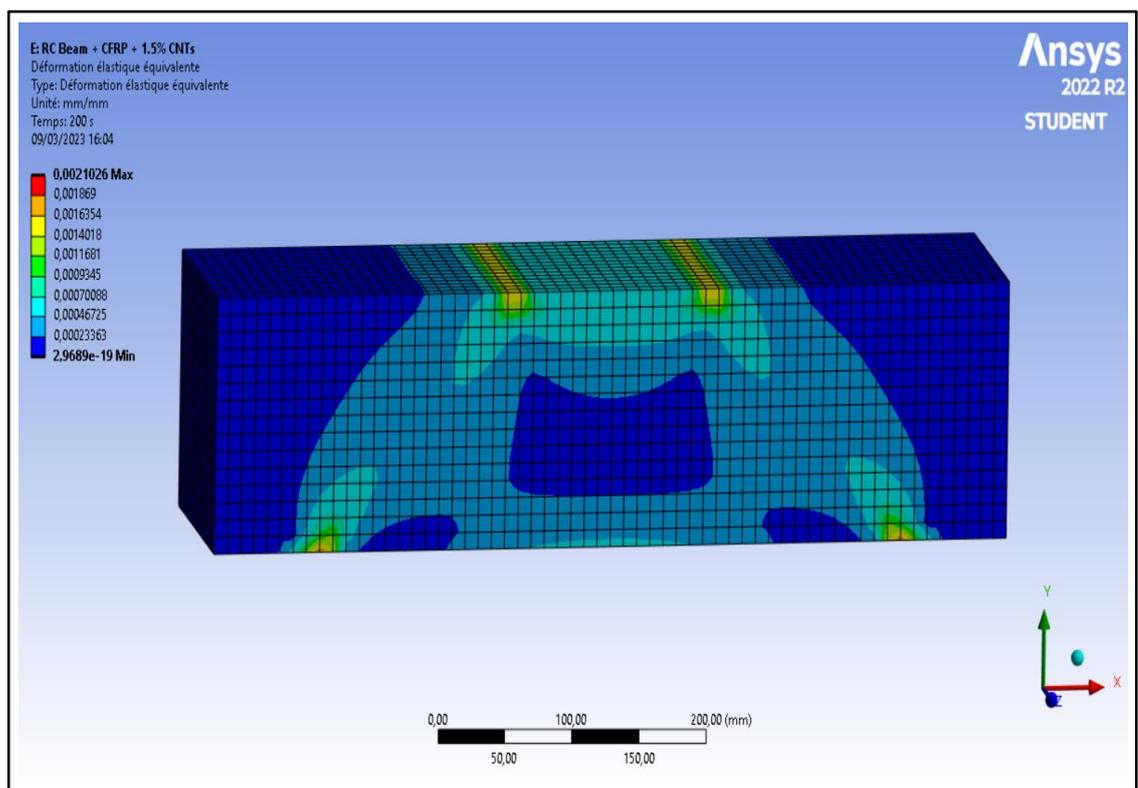


Figure IV.25 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 1.5% CNT's.

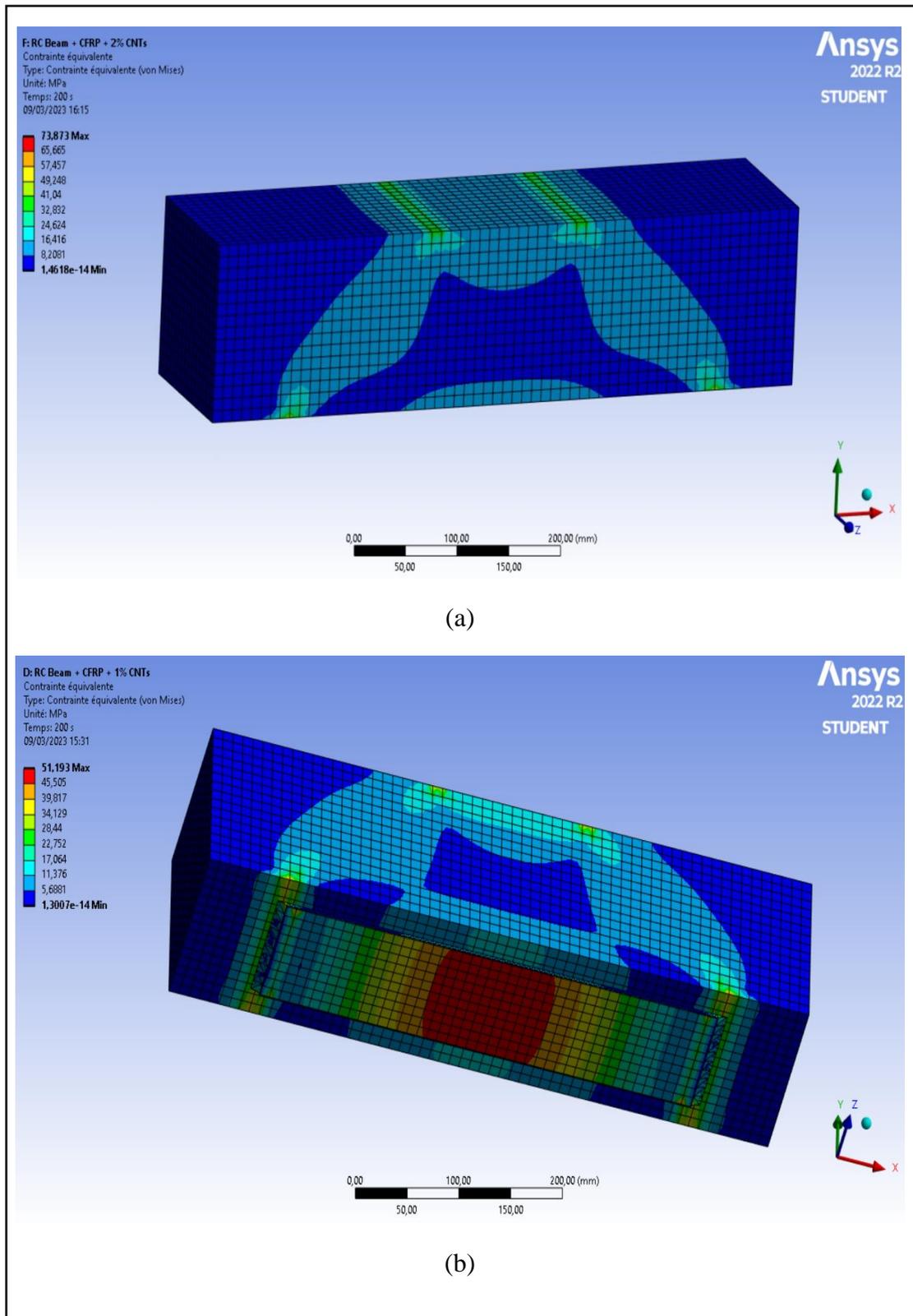
**vi. Poutre renforcée par composite amélioré avec 2% CNT's « PRI-2 » :**

Figure IV.26 : Distribution des contraintes dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 2% CNT's : (a) Vue de face ; (b) Vue de dessous.

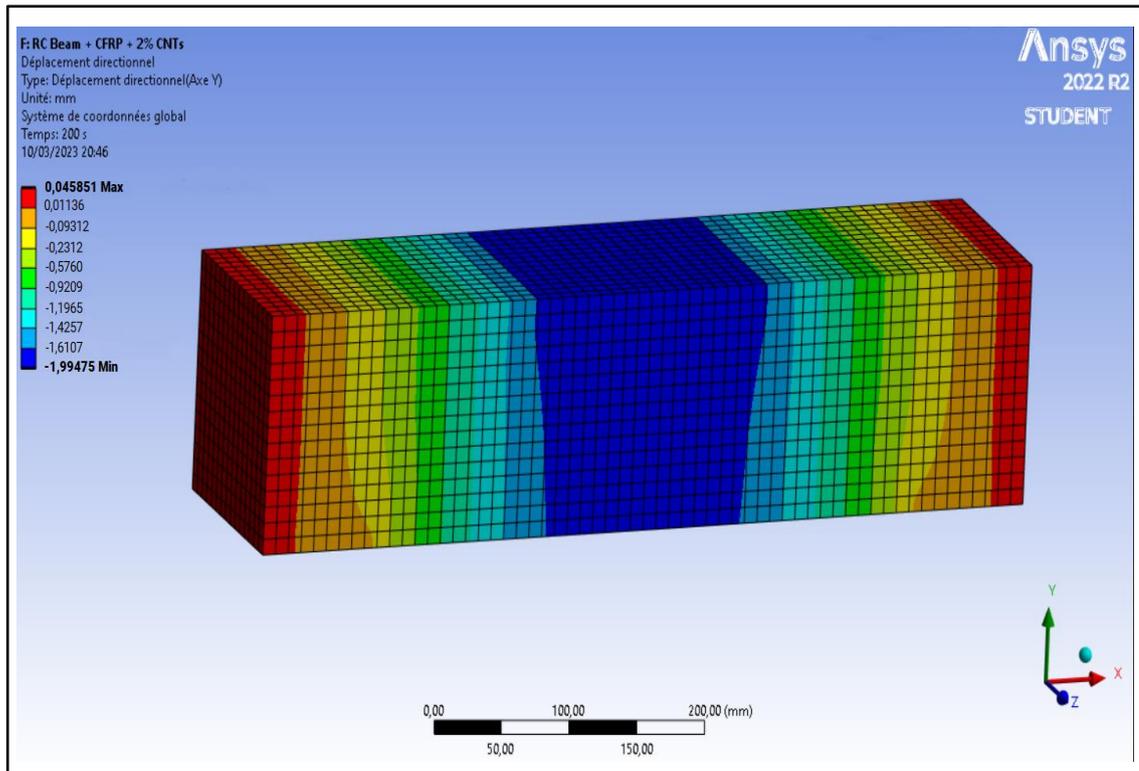


Figure IV.27 : Déplacement total de la poutre renforcée par composite amélioré avec 2% CNT's

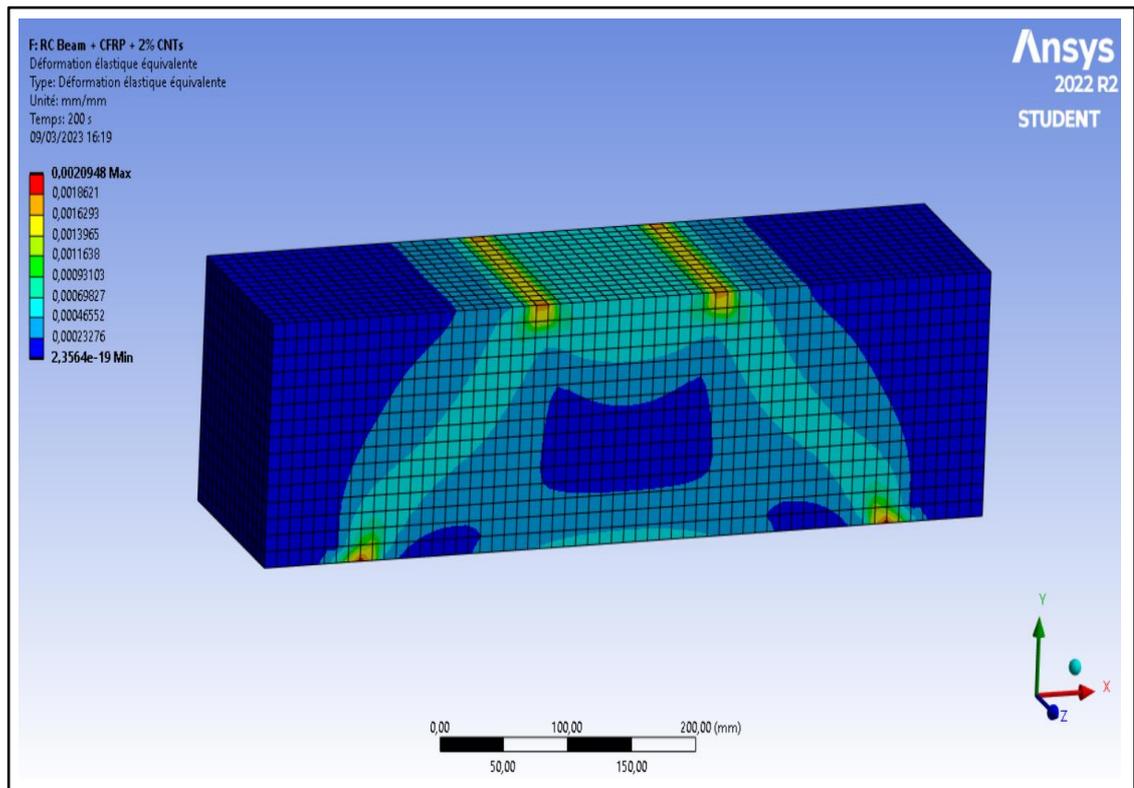


Figure IV.28 : Distribution des déformations dans la poutre renforcée par composite amélioré avec 2% CNT's.

Les différents résultats de cette modélisation numérique sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 Récapitulatif des résultats de la modélisation numérique des poutres renforcées.

<b>Poutre</b>	<b>Contrainte (MPa)</b>	<b>Flèche (mm)</b>	<b>Déformation (%)</b>
Poutre témoin « PC »	43,680	1,26	1,8312
Poutre renforcée « PR1-0 »	44,306	1,42	2,0057
Poutre renforcée « PR1-0.5 »	46,206	1,64	2,0750
Poutre renforcée « PR1-1 »	51,193	1,69	2,1011
Poutre renforcée « PR1-1.5 »	58,375	1,94	2,1026
Poutre renforcée « PR1-2 »	73,873	1,99	2,0948

### IV.3.2 Discussion et commentaires

Dans tous les cas étudiés, et sous l'effet de la symétrie du chargement extérieur, les différentes contraintes et déformations présentent une symétrie axiale. Trois contraintes différentes sont observées : une contrainte de compression localisée dans la partie supérieure des poutres d'essai et surtout près des applicateurs de la charge ; une contrainte de traction sur la partie inférieure de la poutre et sur les lamelles CFRP maximale à mi-travée et une contrainte de cisaillement inclinée à 45° allant des appuis aux applicateurs de la charge. Les déformations observées sont dues principalement à ces contraintes précédentes.

## IV.4 Analyse modale du pont renforcé

### IV.4.1 Principe

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 [124].

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  $\omega_i$  et la forme des modes propres de vibrations  $\phi_i$  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 [124].

- 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).

#### IV.4.2 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 IV.4, avec les formes des modes correspondantes.

Tableau IV.4 Valeurs des fréquences du pont sans renforcement obtenues par ANSYS

MOD	FREQ (HZ)	PERIODE (S)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	3,0177	0,33137820	1	1	1
2	3,2761	0,30524099	1	2	2
3	4,0855	0,24476808	1	3	3
4	6,5274	0,15320036	1	4	4
5	8,8164	0,11342498	1	5	5
6	12,3402	0,08103596	1	6	6
7	14,3025	0,06991785	1	7	7
8	17,8204	0,05611546	1	8	8
9	18,3454	0,05450958	1	9	9
10	19,7590	0,05060985	1	10	10

Les modes propres de vibration du l'ouvrage par éléments finis, observés par la modélisation numérique et ce, avant renforcement des éléments de la structure, sont illustrées dans les figures IV.29 à IV.38.



Figure IV.29 Mode 1. Translation longitudinale (N)

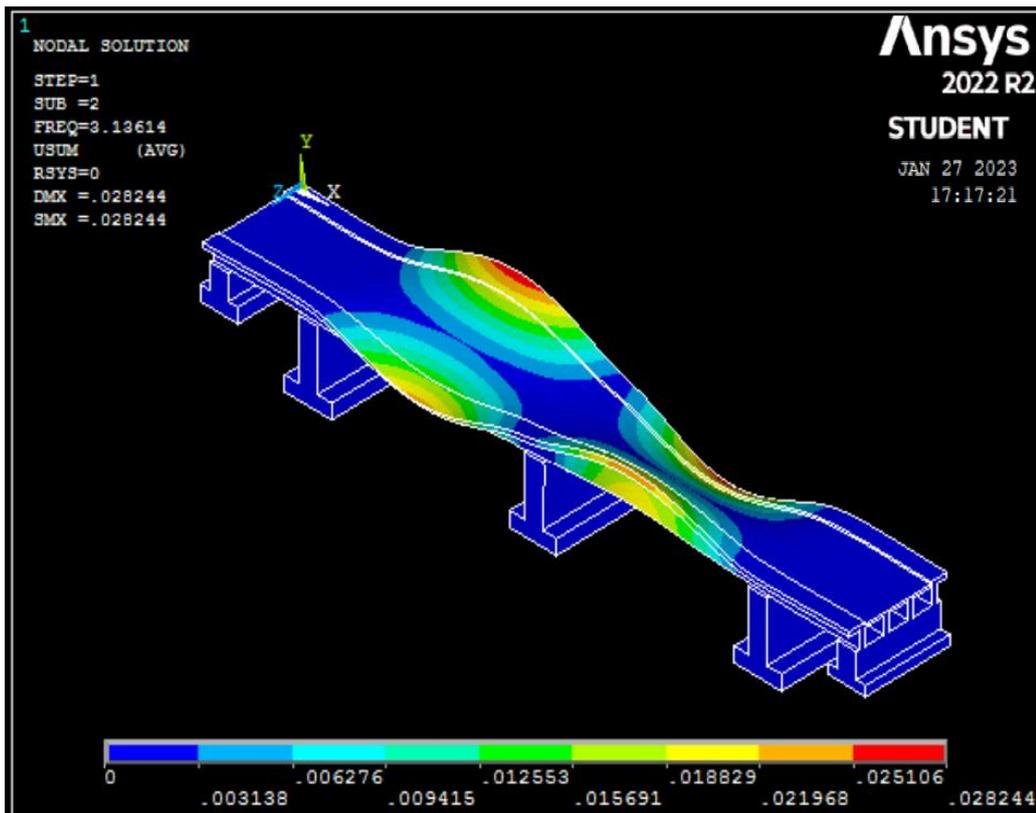


Figure IV.30 Mode 2. Premier fléchissement vertical (Y)

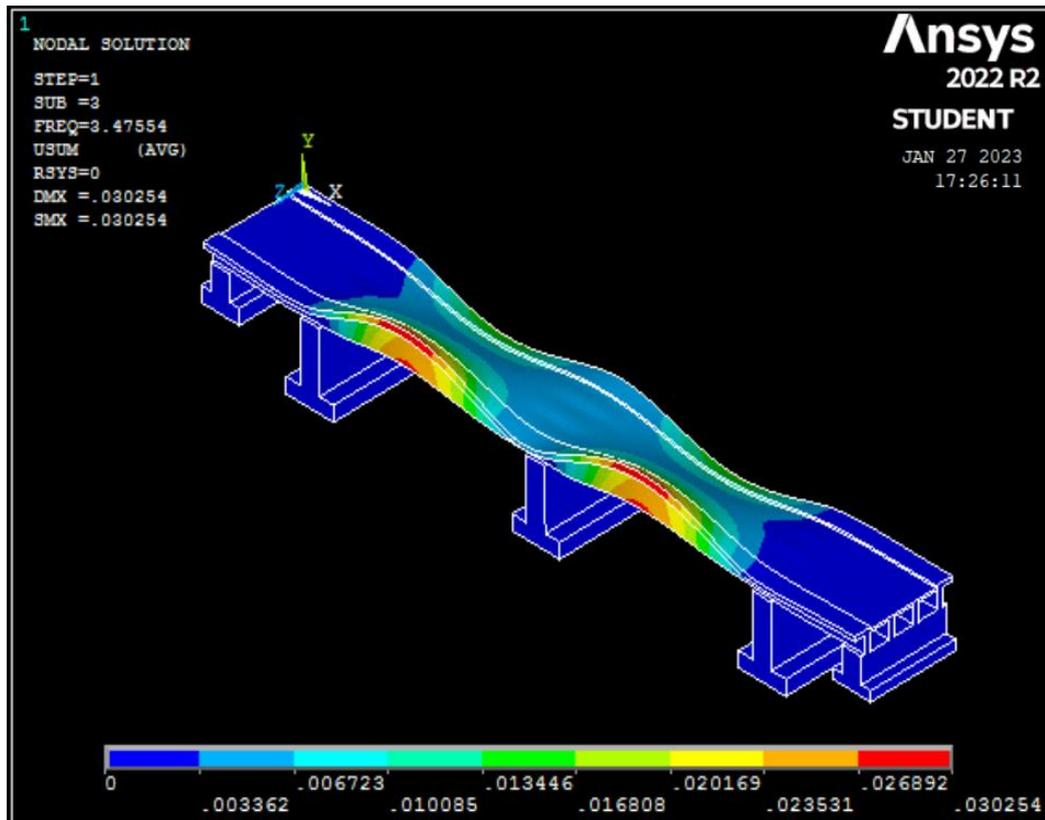


Figure IV.31 Mode 3. Torsion simple

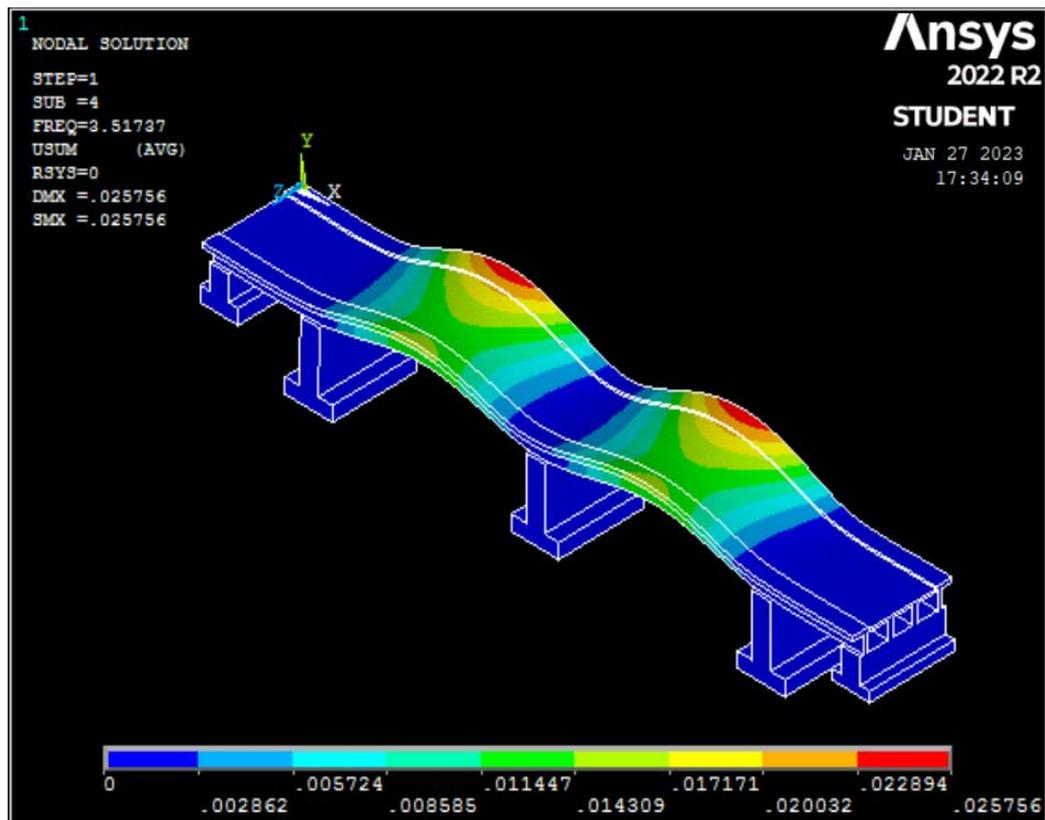


Figure IV.32 Mode 4. 2<sup>ème</sup> Torsion simple

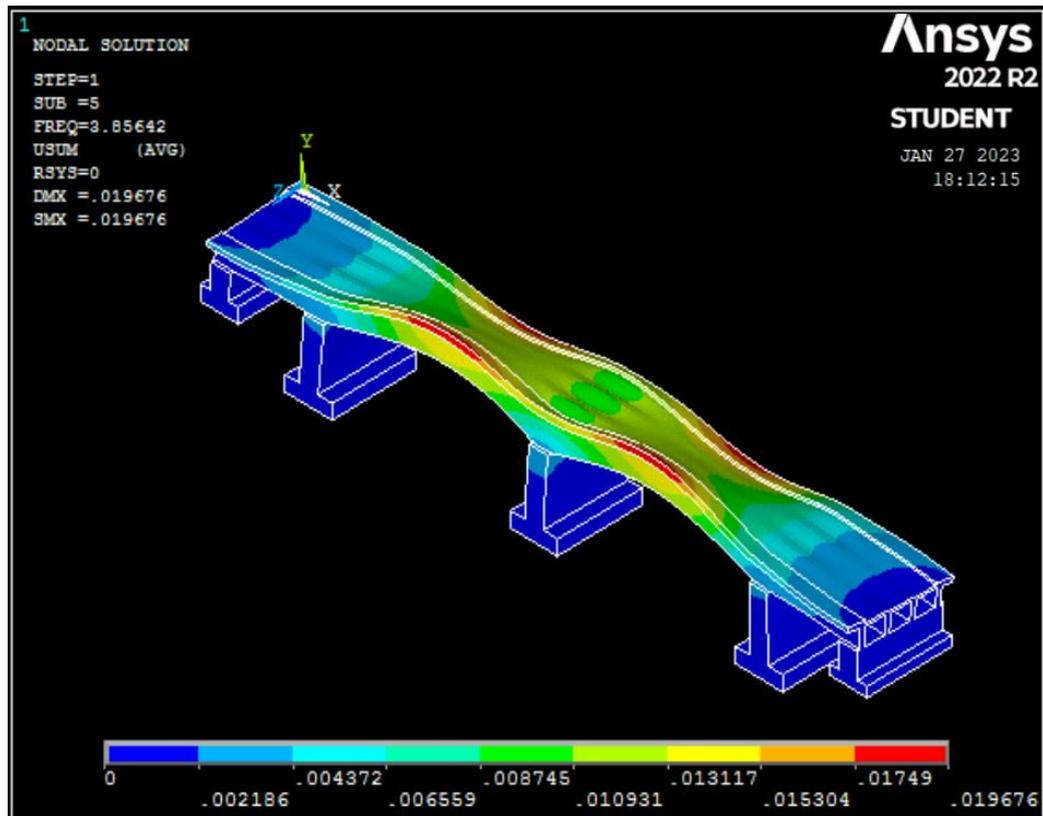


Figure IV.33 Mode 5. Double torsion du tablier

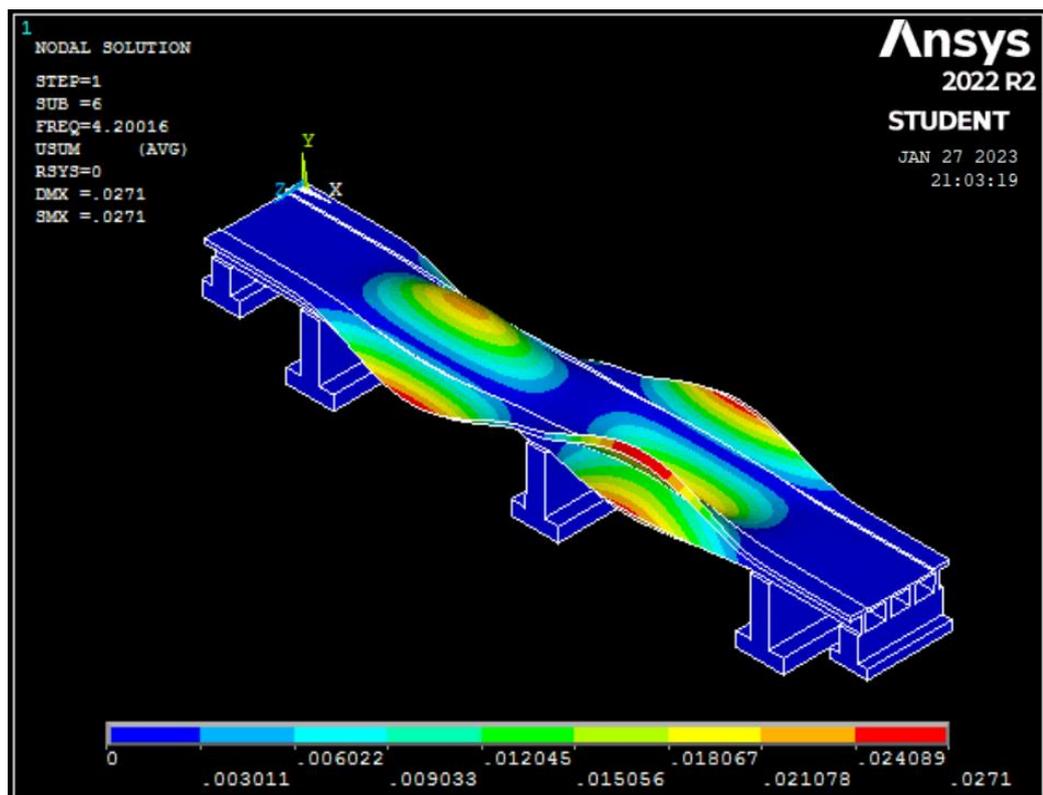


Figure IV.34 Mode 6. Translation latérale du tablier

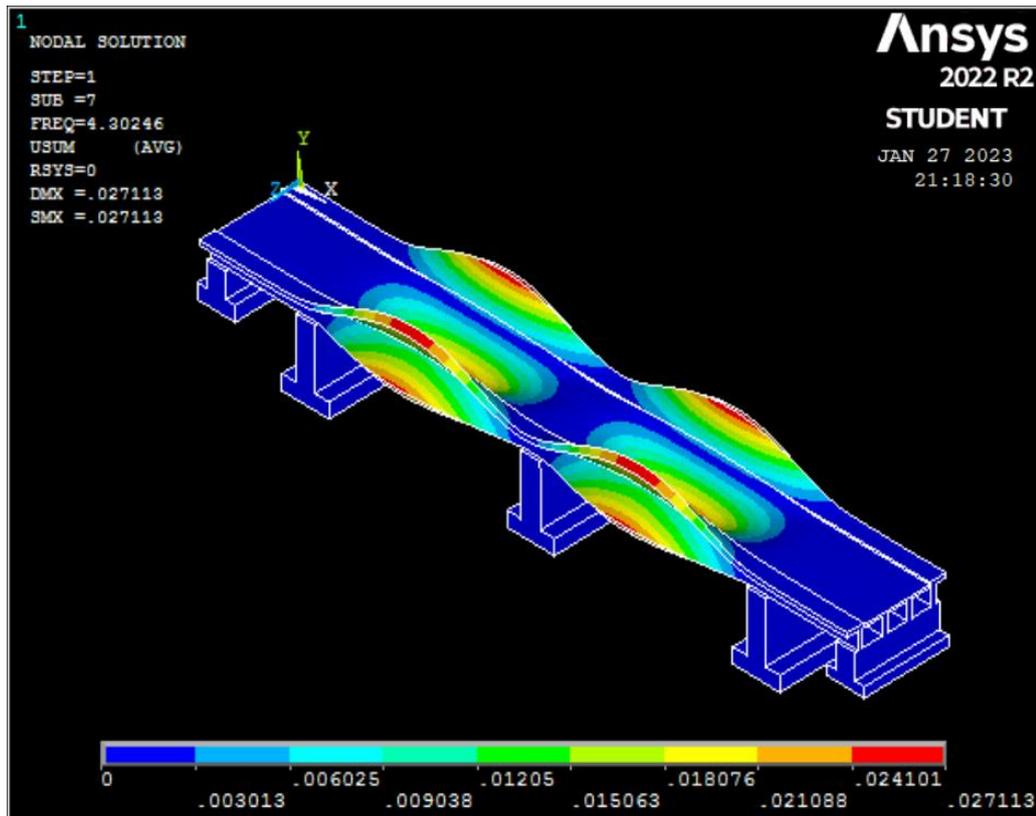


Figure IV.35 Mode 7. Translation latérale du tablier

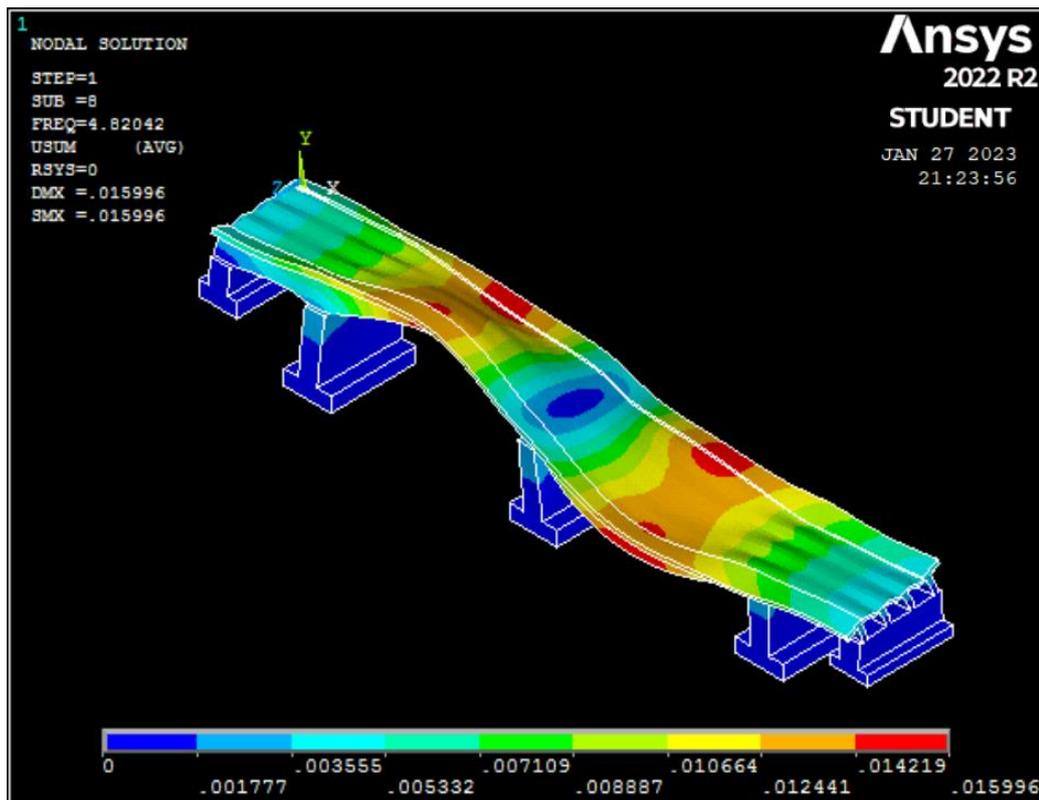


Figure IV.36 Mode 8. Fléchissement fort.

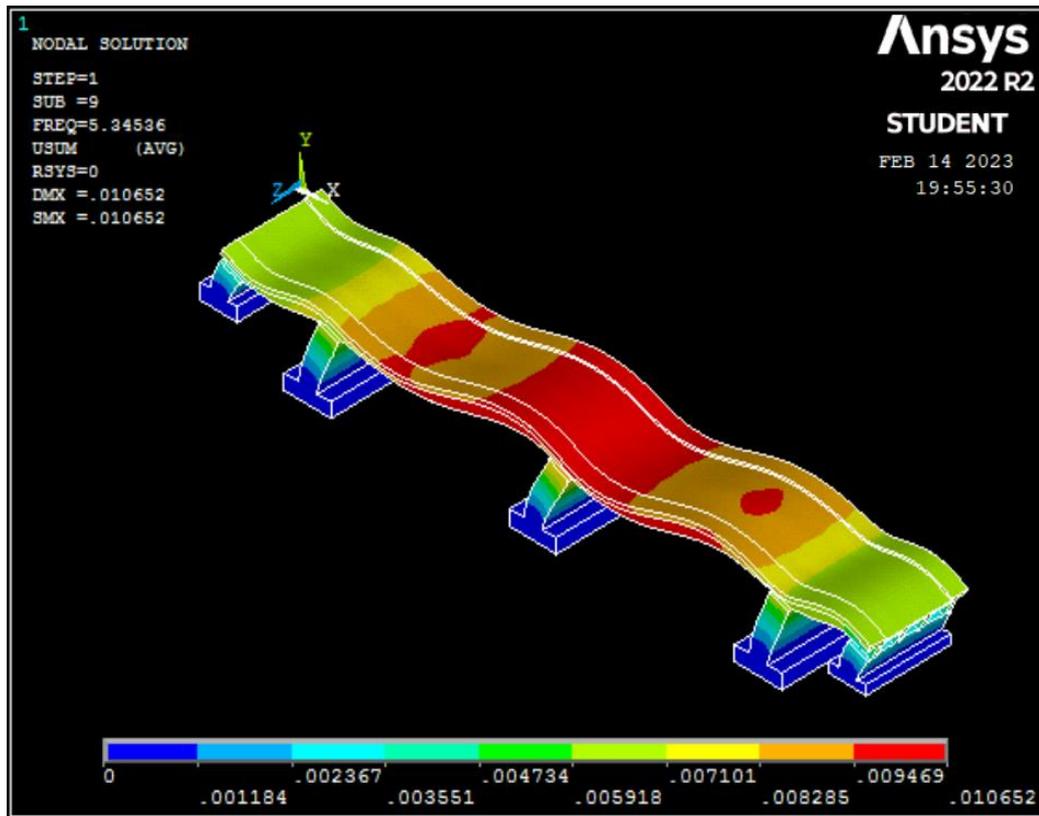


Figure IV.37 Mode 9. Translation latérale (E).

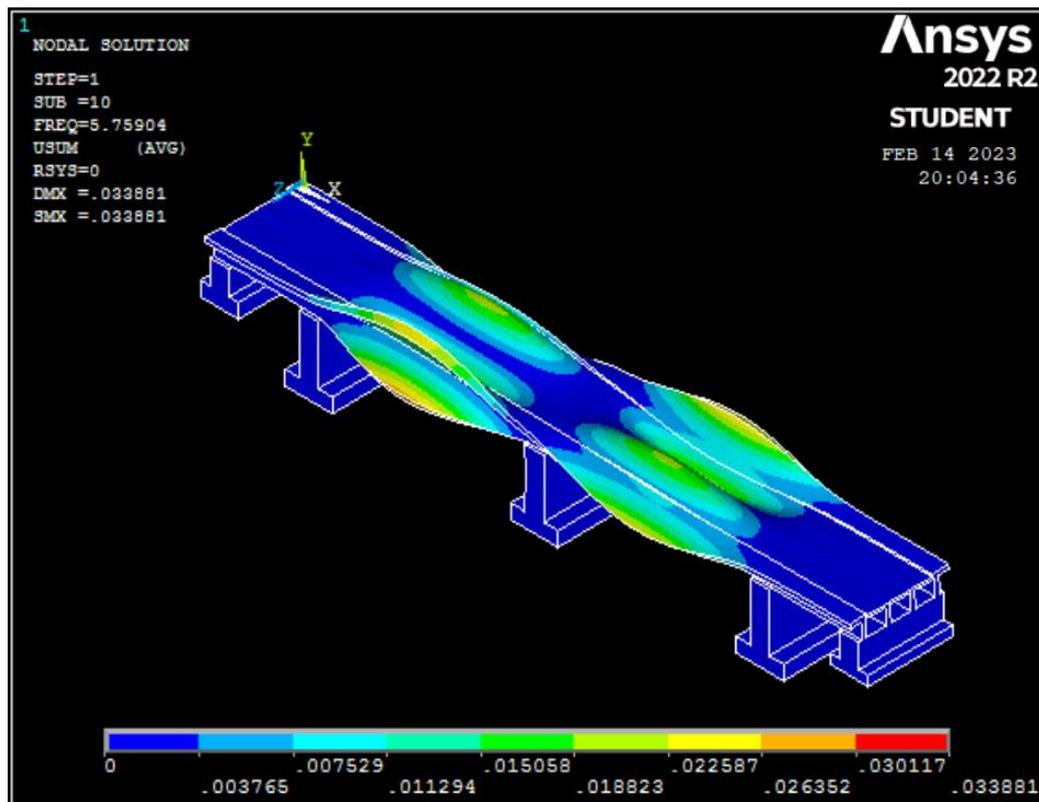


Figure IV.38 Mode 10. Translation latérale (E).

### IV.4.3 Modélisation de pont 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 IV.5, avec la courbe des fréquences et des périodes de pont renforcé par M.C traditionnels.

Tableau IV.5 Valeurs des fréquences du pont renforcé par matériaux composites traditionnels.

MOD	FREQ (HZ)	PERIODE (S)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	3,8203	0,26175955	1	1	1
2	4,2719	0,23408788	1	2	2
3	5,0822	0,19676518	1	3	3
4	7,4209	0,13475454	1	4	4
5	10,1225	0,09878982	1	5	5
6	14,0691	0,07107775	1	6	6
7	15,3318	0,06522391	1	7	7
8	18,8331	0,05309800	1	8	8
9	19,3475	0,05168626	1	9	9
10	20,8625	0,04793289	1	10	10

Les modes propres de vibration de l'ouvrage par éléments finis, observés par la modélisation numérique après renforcement des éléments de la structure par composites traditionnels, sont illustrées dans les figures IV.39 à IV.48.

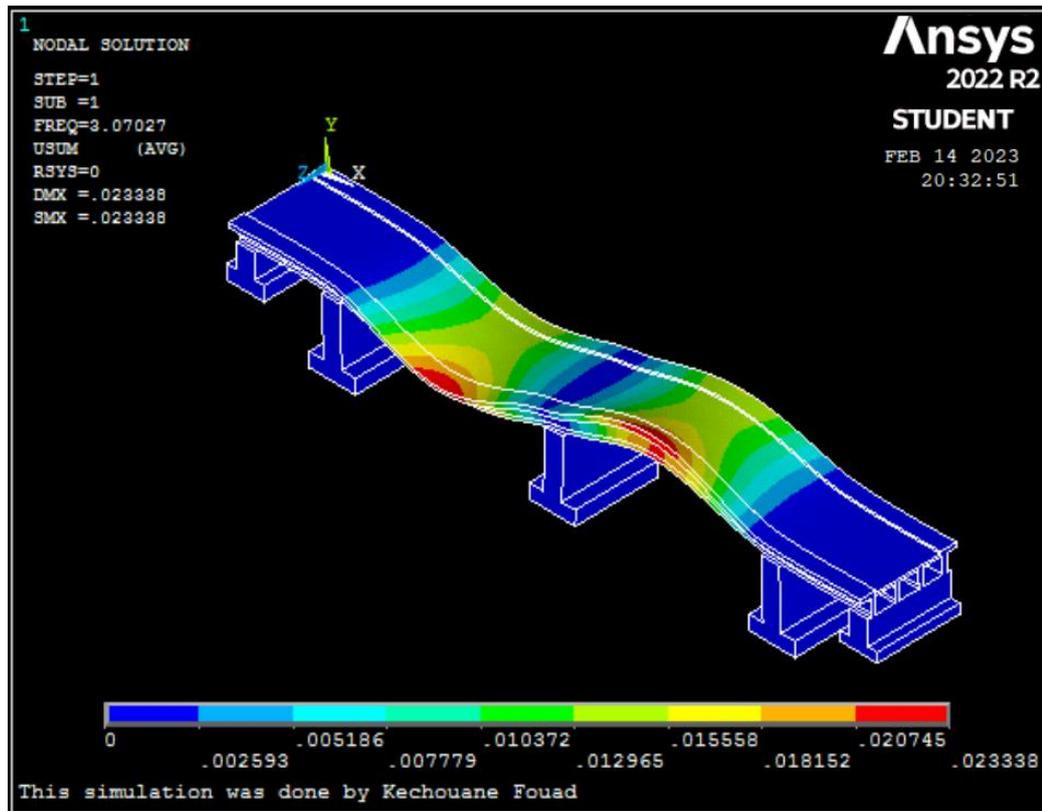


Figure IV.39 Mode 1. Translation longitudinale (N).

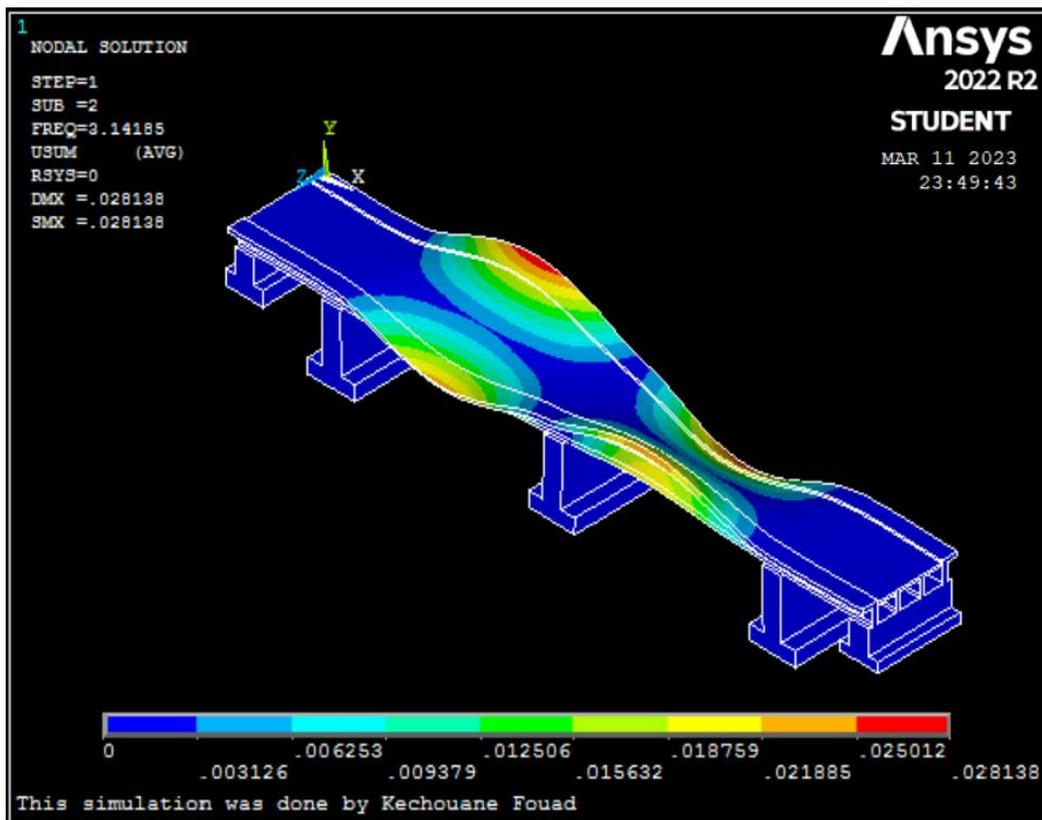


Figure IV.40 Mode 2. Premier fléchissement vertical (Y).

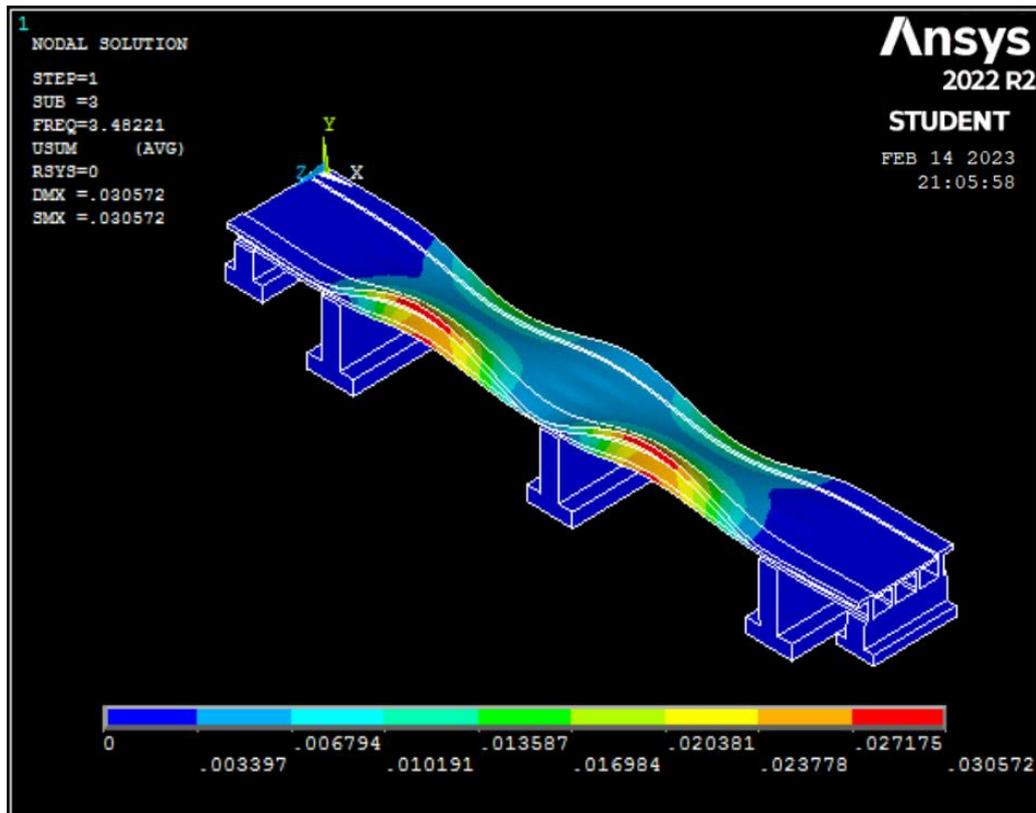


Figure IV.41 Mode 3. Torsion simple.

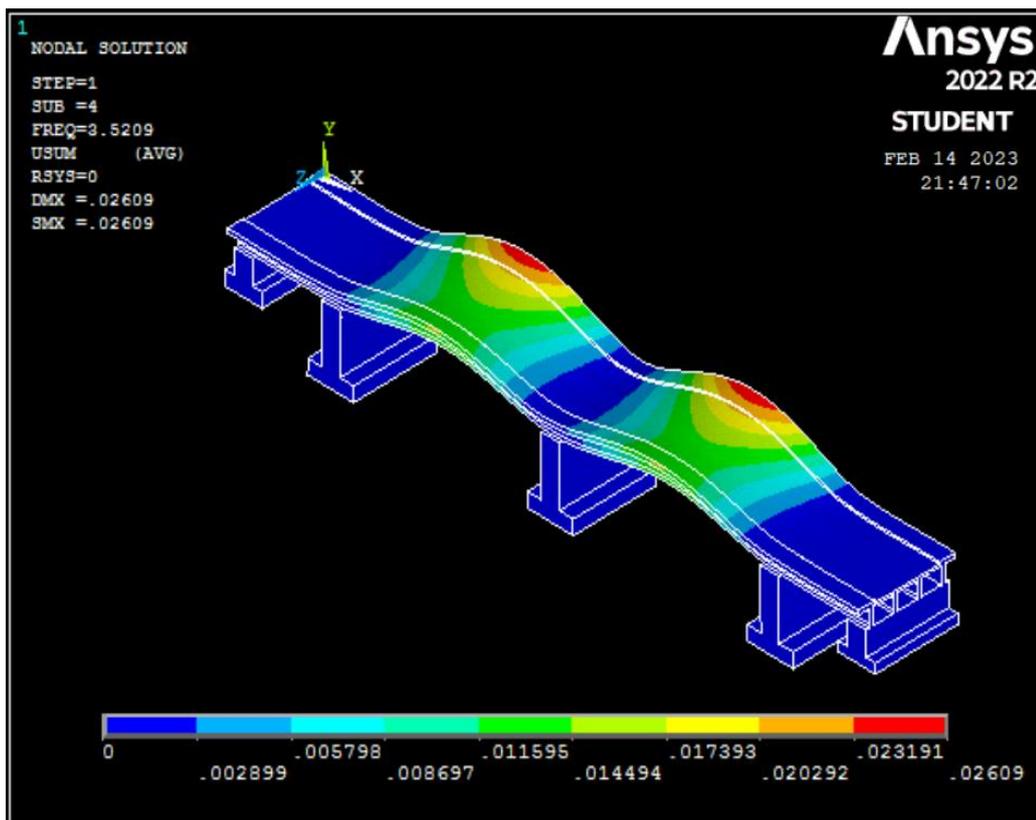


Figure IV.42 Mode 4. Deuxième fléchissement vertical (Y).

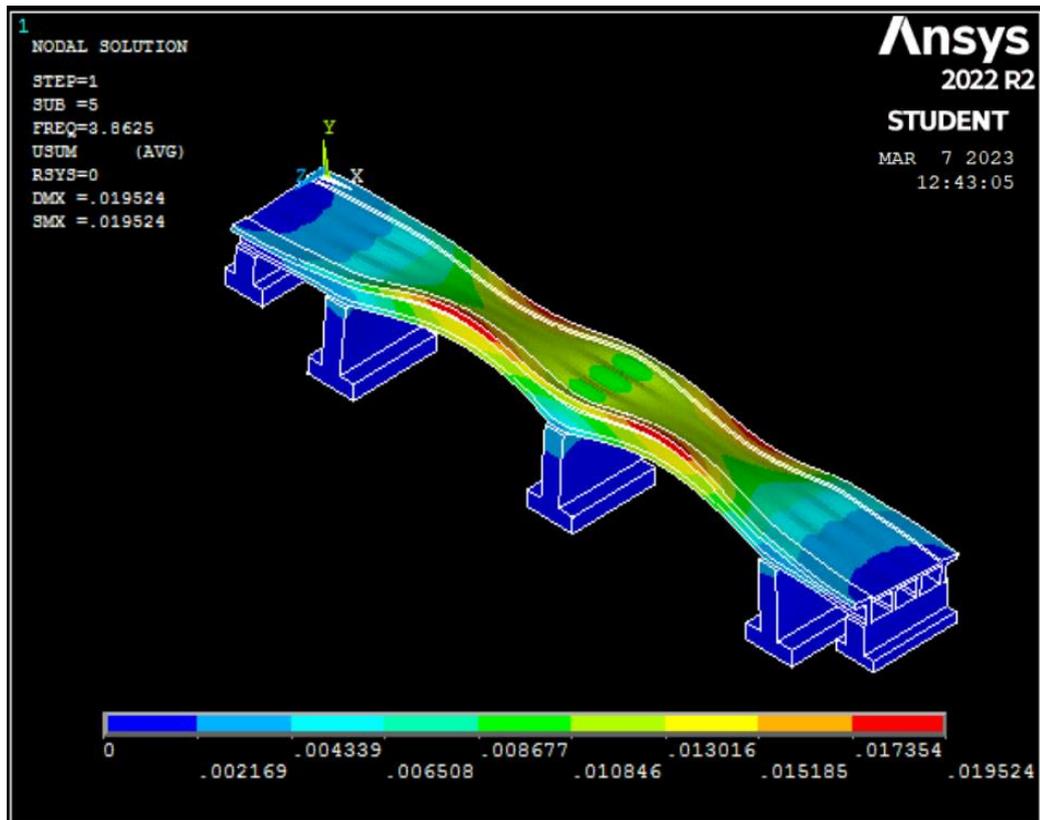


Figure IV.43 Mode 5. Double torsion du tablier.

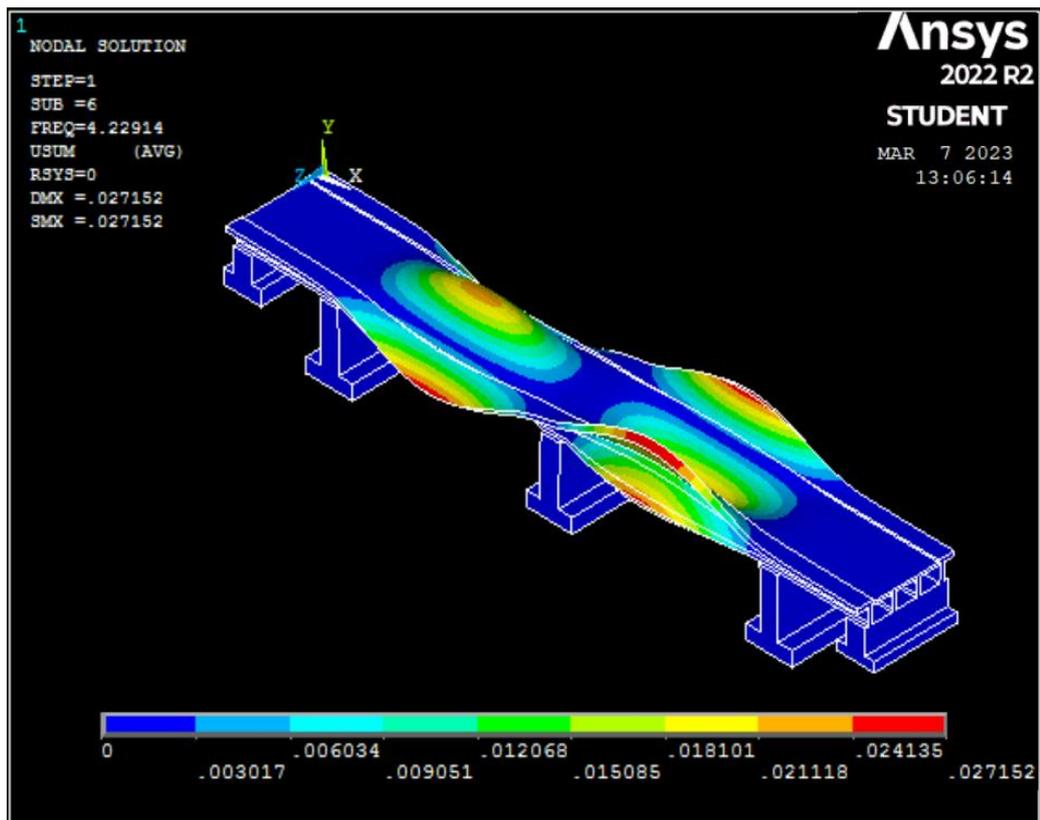


Figure IV.44 Mode 6. Translation latérale (E).

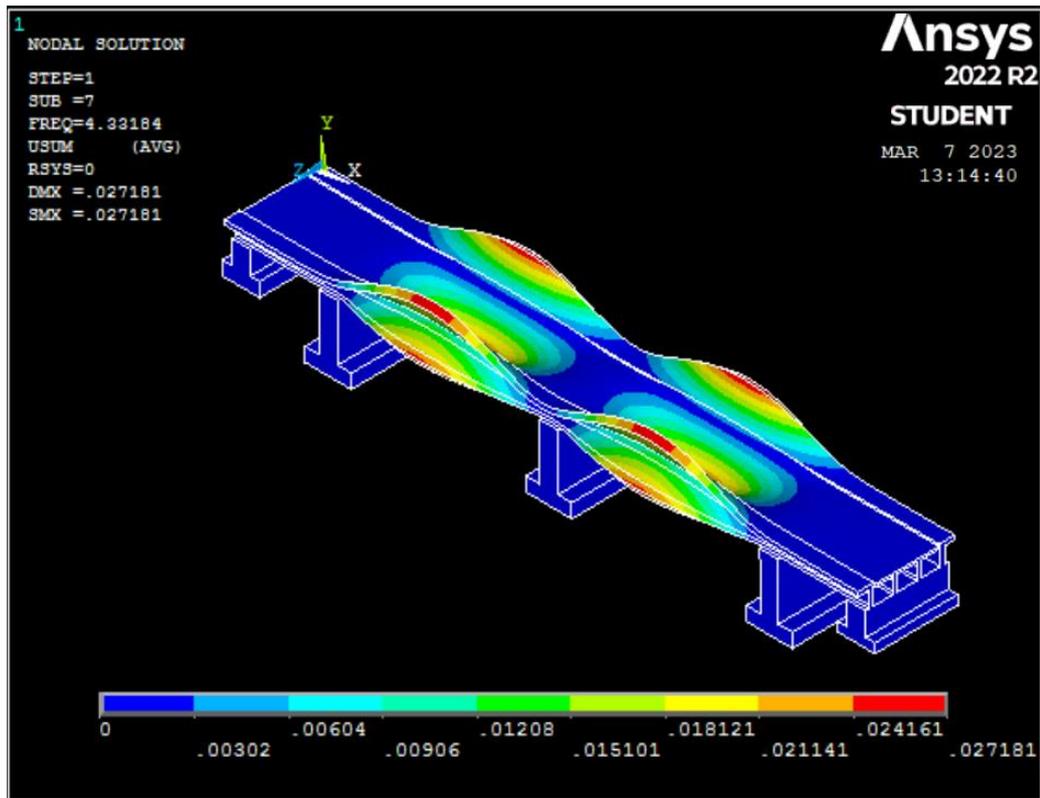


Figure IV.45 Mode 7. Translation latérale (E).

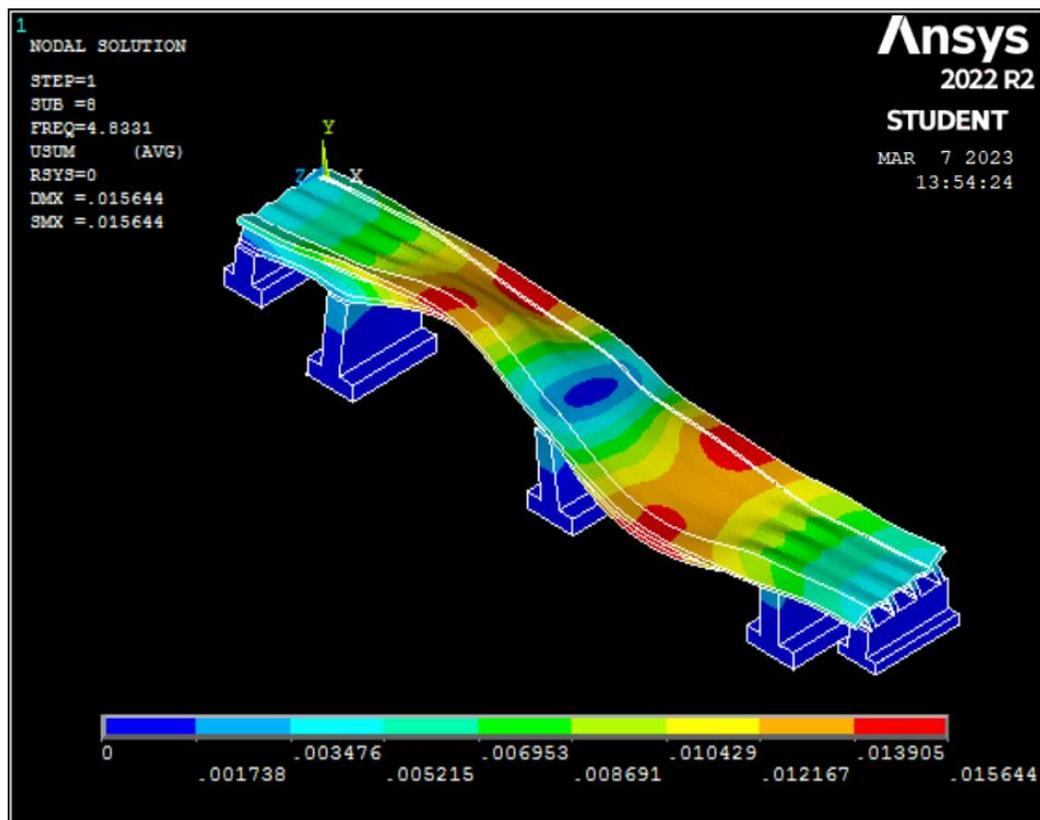


Figure IV.46 Mode 8. Translation latérale (E).

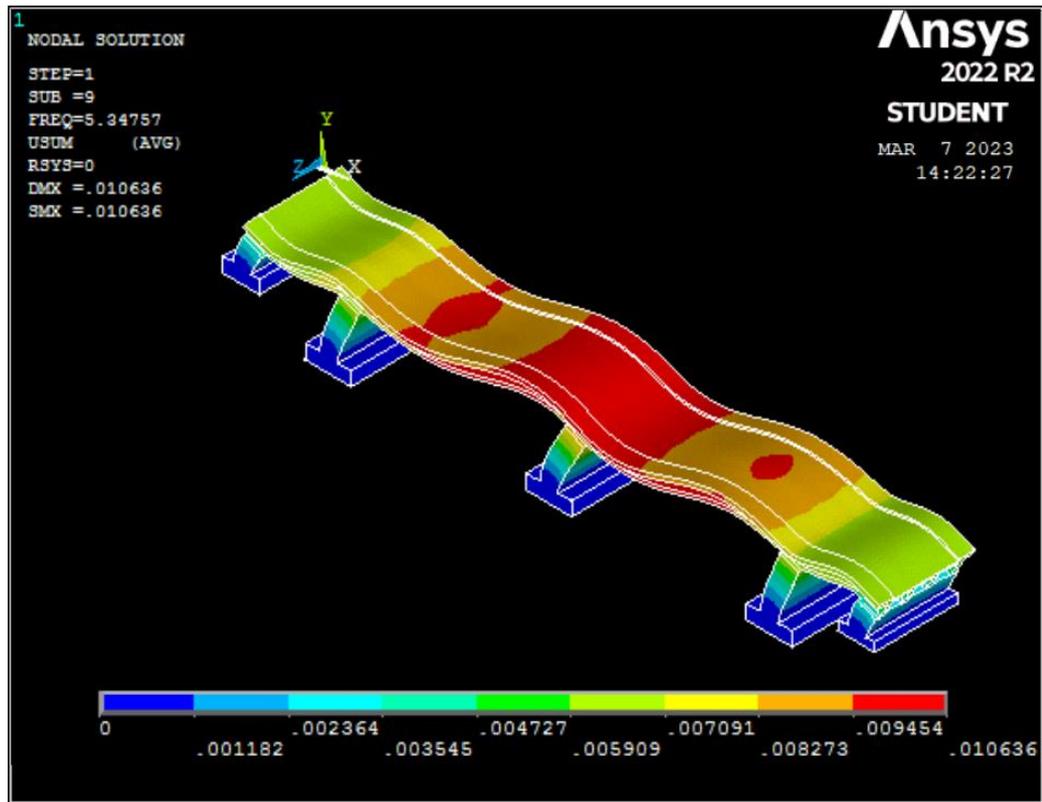


Figure IV.47 Mode 9. Translation latérale (E).

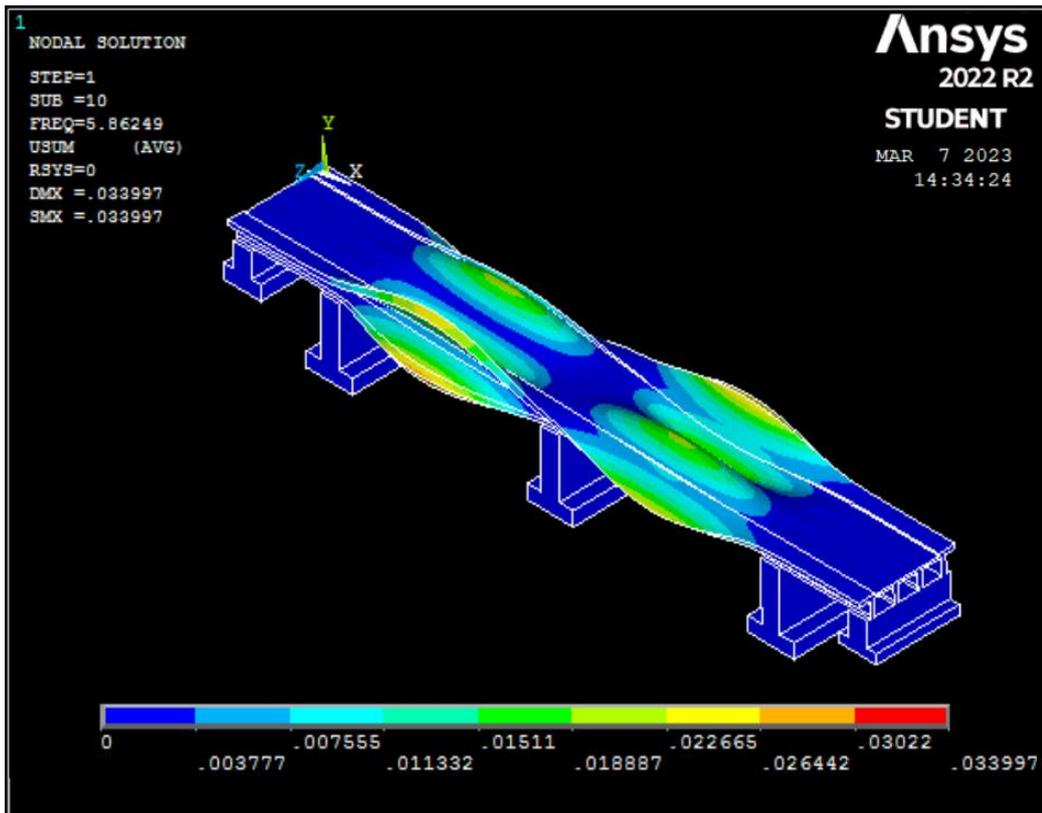


Figure IV.48 Mode 10. Translation latérale (E).

#### IV.4.4 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 IV.6, avec les formes des modes correspondantes.

Tableau IV.6 Valeurs des fréquences du pont renforcé par nano composites.

MOD	FREQ (HZ)	PERIODE (S)	LOAD	STEP	SUBSTEP
1	4,9311	0,20279451	1	1	1
2	6,5130	0,15353908	1	2	2
3	7,1136	0,14057580	1	3	3
4	9,0720	0,11022928	1	4	4
5	12,2242	0,08180494	1	5	5
6	16,2156	0,06166901	1	6	6
7	18,3384	0,05453038	1	7	7
8	19,8366	0,05041186	1	8	8
9	21,3487	0,04684126	1	9	9
10	23,8866	0,04186447	1	10	10

Les modes propres de vibration du l'ouvrage par éléments finis, observés par la modélisation numérique après renforcement des éléments de la structure par nano composites, sont illustrées dans les figures IV.49 à IV.58.

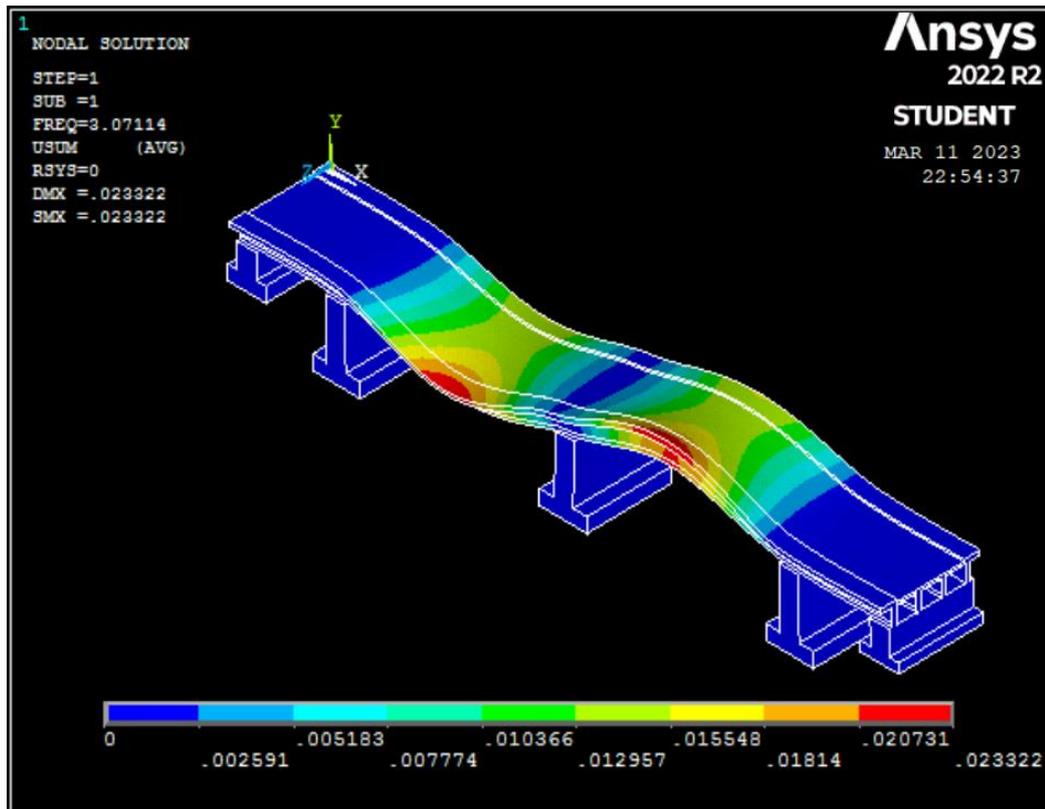


Figure IV.49 Mode 1. Translation longitudinale (N).

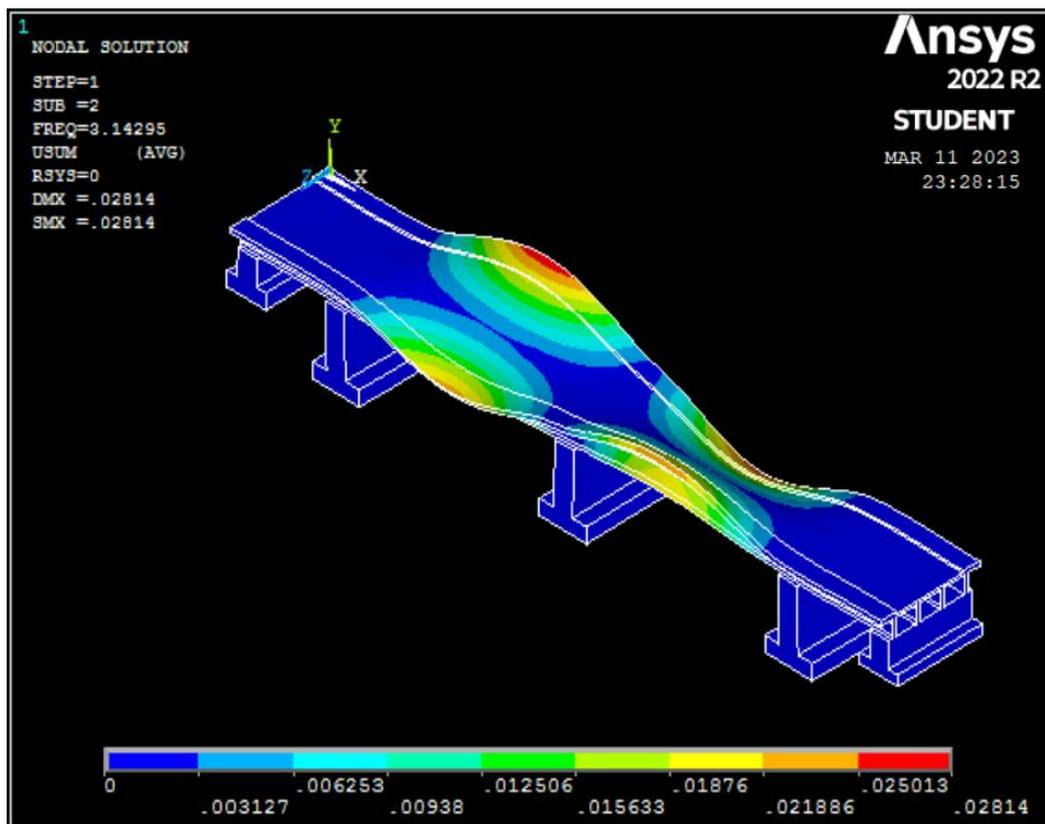


Figure IV.50 Mode 2. Premier fléchissement vertical (Y).

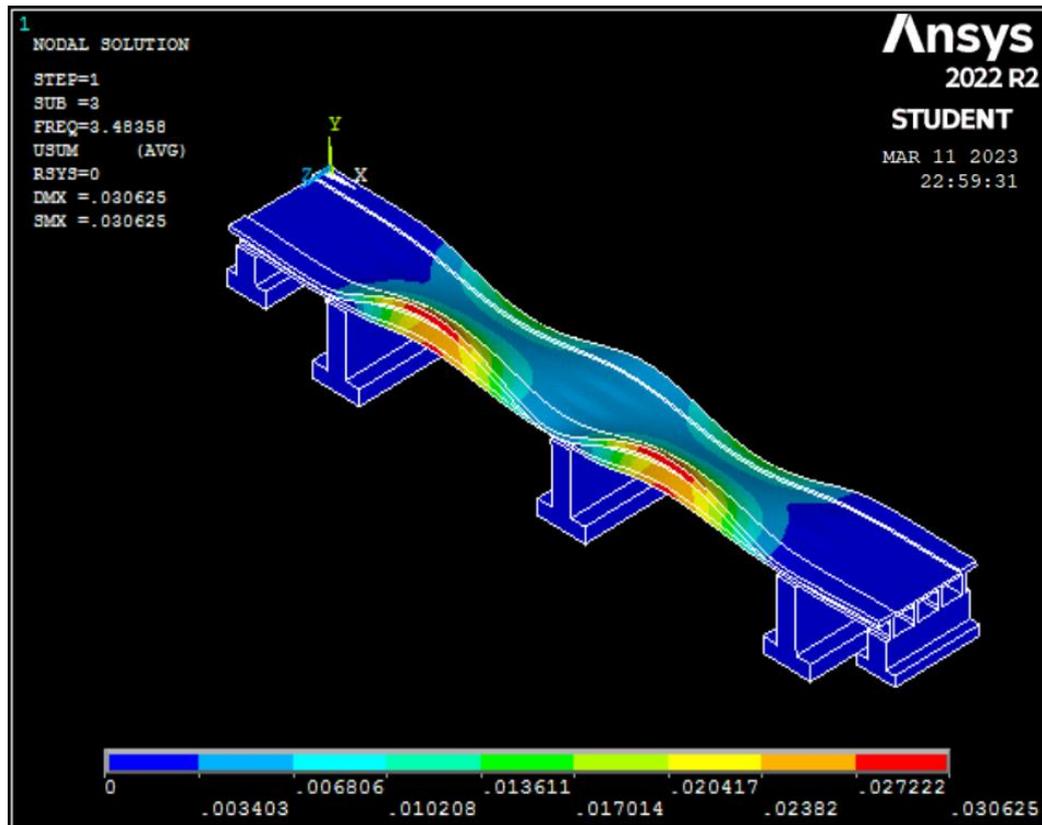


Figure IV.51 Mode 3. Torsion simple.

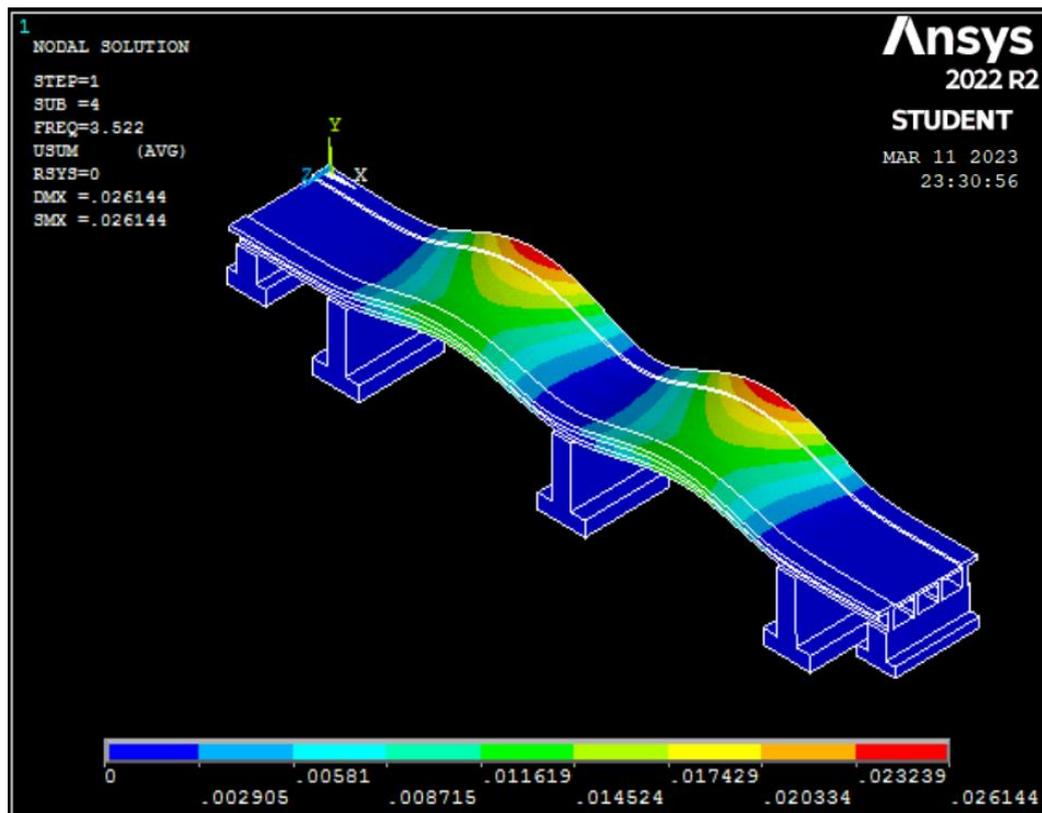


Figure IV.52 Mode 4. Deuxième fléchissement vertical (Y).

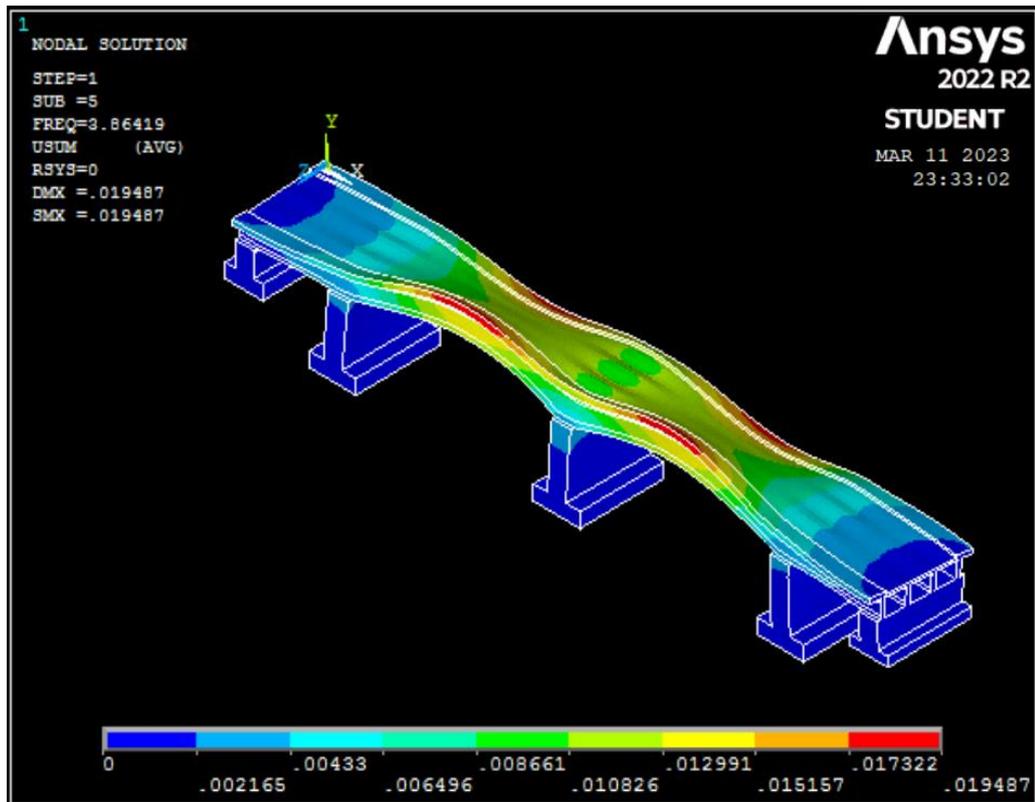


Figure IV.53 Mode 5. Double torsion du tablier.

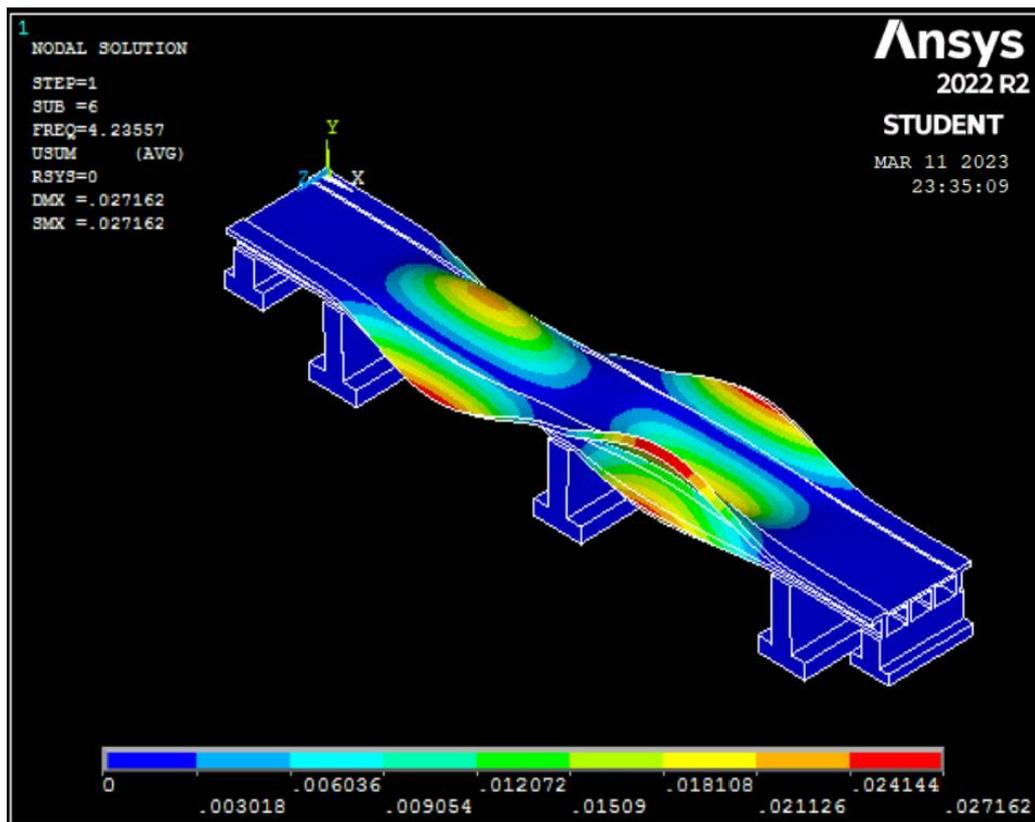


Figure IV.54 Mode 6. Translation latérale (E).

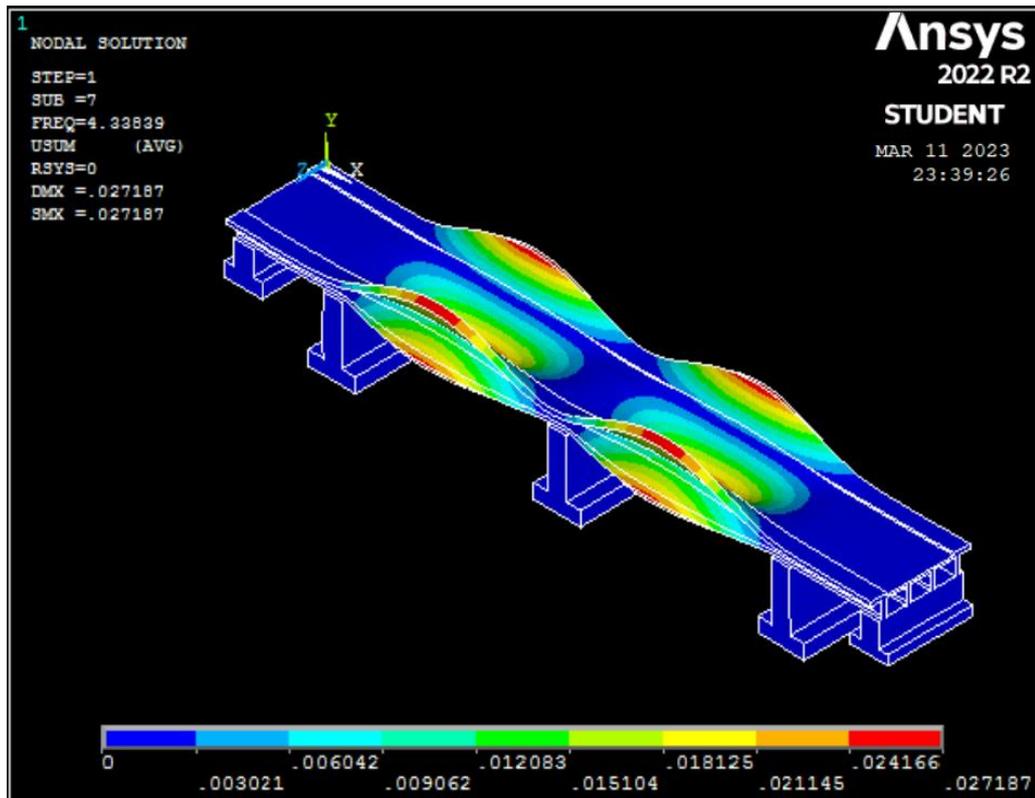


Figure IV.55 Mode 7. Translation latérale (E).

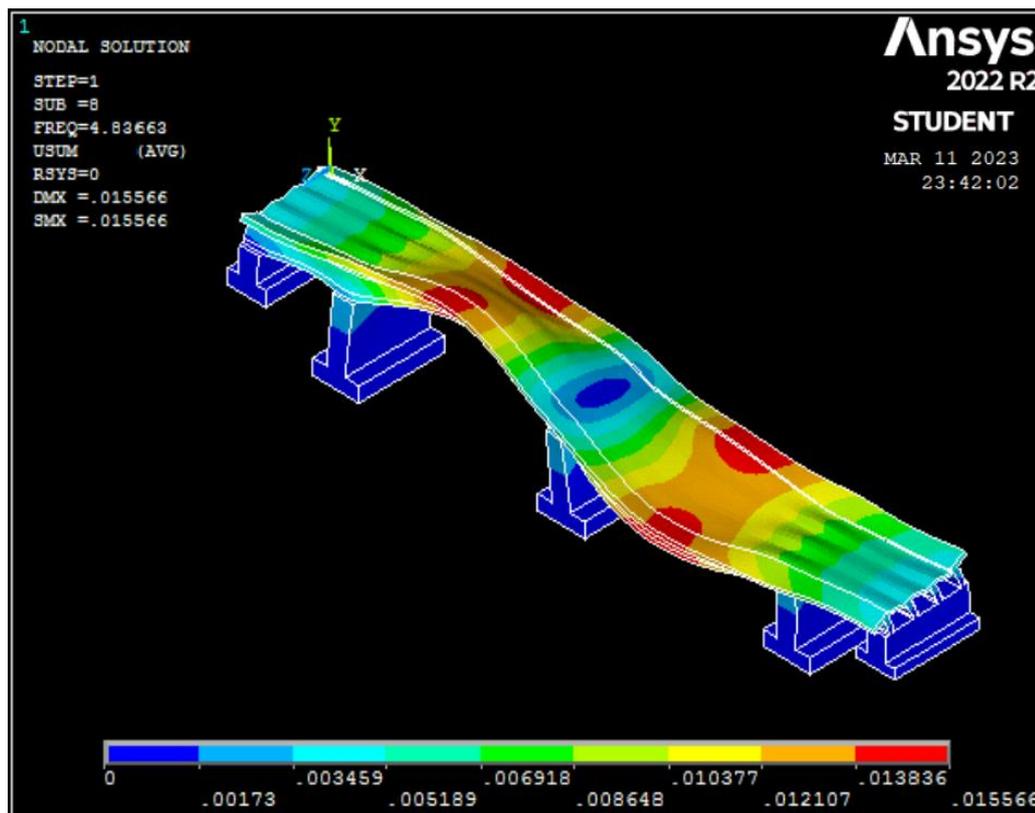


Figure IV.56 Mode 8. Translation latérale (E).

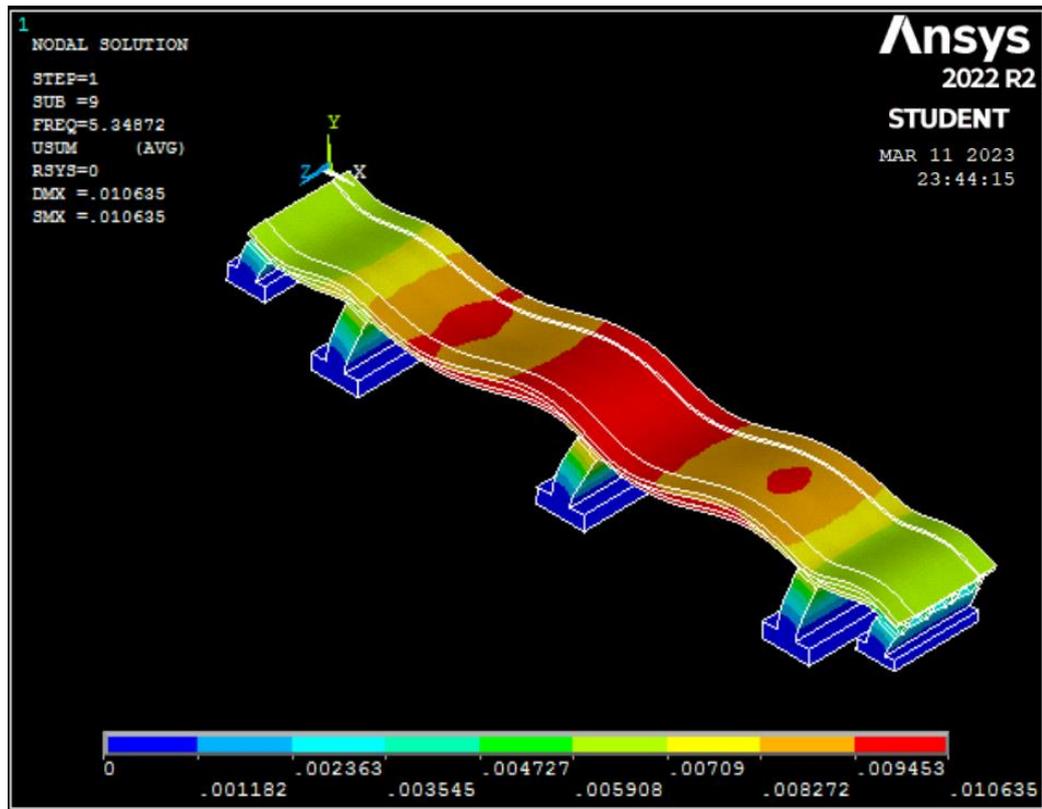


Figure IV.57 Mode 9. Translation latérale (E).

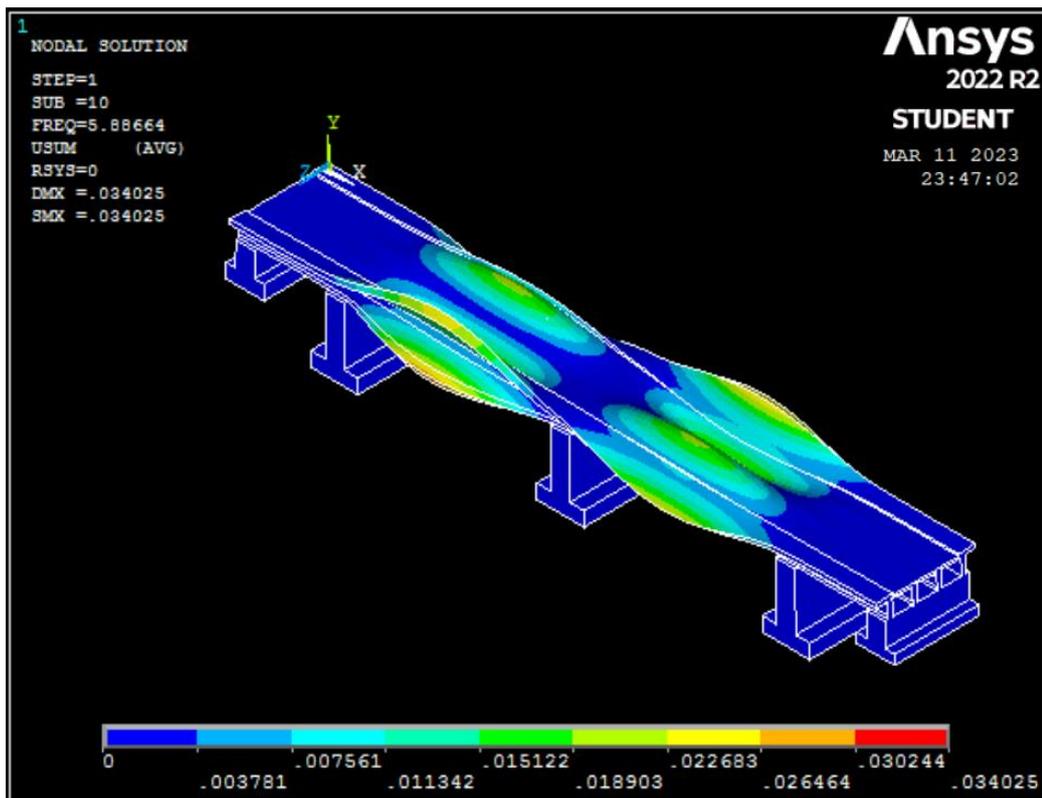


Figure IV.58 Mode 10. Translation latérale (E).

### IV.5 Discussion et commentaires

Nous présentons, ci-après le tableau IV.7, relatif aux valeurs trouvées des fréquences de l'analyse numérique.

IV.7 Tableau des fréquences des différents cas de modélisation

N°	Fréquences avant renforcement (Hz)	Fréquences après renforcement (Hz)	Fréquences après insertion CFRP/CNTs (Hz)	Mode
1	3.02	3.82	4.93	Horizontal (N)
2	3.28	4.27	6.51	Vertical (Z)
3	4.09	5.08	7.11	Torsion
4	6.53	7.42	9.07	Vertical (Z)
5	8.82	10.12	12.13	Double Torsion
6	12.34	14.07	16.22	Horizontal (E)

Les six premiers modes dominants ont été distingués pour les trois comparaisons (avant l'application du renforcement et après le renforcement par les composites CFRP (avec et sans application de nanotubes CNTs). Le mode dominant est le mode de translation longitudinale (N) avec de nettes augmentations (de 3,02 à 3,82 Hz) et (de 3,02 à 4,93 Hz), respectivement pour le renforcement avec les composites CFRP seuls et pour le renforcement avec les performances améliorées de la résine de liaison.

Il s'agit de gains de 26,5% et 63,25%. Il a été constaté que l'insertion de nanotubes a augmenté la fréquence de près de 29%, avec seulement 2% d'utilisation de CNT en poids. Pour les autres modes, on a constaté que le composite CFRP améliorait la fréquence d'environ 31% au maximum, contre près de 98,5% pour le CFRP avec la résine mélangée aux CNTs. L'amélioration de la qualité et des performances de l'adhésif du composite est très bénéfique pour la réparation des structures en béton en raison de l'augmentation appréciable de la rigidité transversale  $K_y$ .

Pour les formes des modes de vibration, la même observation (type de mode) est généralisée et ceci est compréhensible étant donné la rigidité transversale  $K_y$  beaucoup plus élevée que la rigidité longitudinale  $K_x$  de la structure testée [126].

En corrélant les résultats expérimentaux obtenus lors de l'essai de flexion en laboratoire (à échelle réduite) sur des poutres renforcées par l'insertion de nanotubes (CNT) et le modèle numérique de la structure renforcée (à échelle réelle), on voit clairement le gain apporté par l'augmentation des performances de la colle de résine (adhésif). En effet, les paramètres renforcés par l'application de matériaux composites avec insertion de nanotubes CNTs.

Le travail a consisté, d'une part, en une investigation expérimentale où douze poutres en béton armé ont été fabriquées, renforcées par des CFRP (sans ou avec des nanotubes CNTs), et ensuite testées sous des charges de flexion à quatre points. Dans la deuxième partie, une analyse modale utilisant la méthode des éléments finis a été entreprise sur une ancienne structure de pont en béton, dont les éléments porteurs ont été renforcés avec des composites CFRP renforcés avec 2% de nanotubes CNTs.

**CONCLUSIONS GENERALES  
ET RECOMMANDATIONS**

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Le présent travail a fait l'objet d'étude du comportement des éléments structuraux en béton armé renforcé et/ou réparés par composites collés avec insertion des nanotubes CNTs.

Le travail a consisté, d'une part, en une investigation expérimentale où douze poutres en béton armé ont été fabriquées, renforcées par des CFRP (sans ou avec des nanotubes CNTs), et ensuite testées sous des charges de flexion à quatre points. Dans la deuxième partie, une analyse modale utilisant la méthode des éléments finis a été entreprise sur une ancienne structure de pont en béton, dont les éléments porteurs ont été renforcés avec des composites CFRP renforcés avec 2% de nanotubes CNTs. Les conclusions à tirer de ce travail, se résument à :

- Les résultats obtenus, tant expérimentaux que numériques, permettent de recommander un choix adéquat de la technique de réparation et/ou de renforcement pour toutes les structures anciennes ou détériorées du patrimoine existant en béton armé.
- L'incorporation de nanotubes (CNTs) dans l'adhésif du composite a augmenté la résistance des poutres testées, avec des dosages variant de 0,05% à 2% de ces nanotubes. Ces derniers ont donné des gains allant de 68% à 116% (poutres BR1, BR2, BR3 et BR4), contre 57% sans NTC (poutre BL), soit une augmentation moyenne de 40%.
- Le modèle d'éléments finis choisi pour calibrer les résultats expérimentaux des poutres renforcées, a donné des valeurs très proches de la réalité expérimentale, avec des valeurs allant de 3.5% à 7% (pour la charge de rupture ou la déformation), ce qui suggère que le modèle était adéquat. La modélisation numérique par application de la méthode des éléments finis (FEM), largement utilisée de manière universelle, nous a permis de choisir un modèle numérique proche de la réalité et permettant une lecture approfondie des résultats.
- Il est possible d'appliquer la technique de l'armature composite collée, améliorée par l'insertion de nano poudres de CNTs (au niveau de la résine) sur le support d'un tablier de poutre en béton, pour éviter la délamination (décollement) du composite, surtout dans des climats chauds.
- La valeur du module d'élasticité E indique l'état réel du matériau et les dommages possibles au tablier. La rigidité transversale  $K_y$ , avant et après renforcement, reflète les changements dans la structure.
- Le mode prédominant du pont est la flexion verticale, dans la direction horizontale, avec une fréquence de 3,02 Hz avant le renforcement CRFP et 3,82 Hz et 4,93 Hz respectivement après (sans et avec CNT).

Nous recommandons pour futurs travaux de recherche de compléter par ce qui suit :

- ✓ Des investigations plus poussées dans le laboratoire, avec l'incorporation d'autres types de nano-composites, en prenant des éléments de structures à vraies grandeurs et un béton d'excellente qualité.
- ✓ Etudier d'autres systèmes CFRP/Epoxy commercialisés par d'autres fabricants afin de mieux comparer l'effet de l'insertion des CNTs sur le comportement de ses différents systèmes.
- ✓ Etudier, dans le laboratoire l'effet de la température et du climat sur les performances de la résine améliorée par ajout des CNTs, afin de simuler le comportement de ses derniers dans des climats extrêmes.
- ✓ Suivre les performances des nanotubes de carbone CNTs en réalisant des essais au microscope électronique à balayage (MEB) et diffraction aux rayons X (DRX).
- ✓ Des essais non destructifs, pour les structures anciennes (de ponts ou de bâtiments) existantes, avant et après leur réparation, avec l'application des composites CFRP, modifiés par insertion des nanotubes sont très souhaitables.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1] Mordor Intelligence (2021), Report: ‘‘Composite materials market- Growth, Trends, Covid19 Impact and Forecast (2022-2027) (In French), Nanakramguda Rd, Financial District, Gachibowli, Hyderabad, Telangana – 500008, India.
- [2] Kechidi M. (2020), Le marché des matériaux composites - Tendances et perspectives des aéro-composites, Nacelles Brèves/ Short Stories.
- [3] Abdessemed M. (2011), Etude expérimentale et modélisation du comportement des poutres en béton armé renforcées par des matériaux composites - Cas des ponts, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique Alger.
- [4] Abdessemed M., Kenai S., Bali A., Kibboua A. (2011), Dynamic analysis of a bridge repaired by CFRP: Experimental and numerical modelling, Construction and Building Materials, Vol. 25, Issue 3, pp. 1270-1276, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.025>.
- [5] Iijima S. (1991), Synthesis of Carbon Nanotubes. J. Nature, 354, pp.: 56-58. <http://dx.doi.org/10.1038/354056a0>.
- [6] Balgura P.K., Samuel D.G.H., Thumu U. (2021), A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites, Materials Today: Proceedings, Vol. 44, Part 1, pp. 346-355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.742>.
- [7] Ouzaa Kh. (2015), Rehabilitation des structures, Polycopié de Cours, Faculté d’Architecture et de Génie Civil, Université des sciences et de la technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, Algérie, 75 pp.
- [8] Angar S. (2020), Réhabilitation d’un ouvrage d’art sur oued Djeddi (Commune Ouled Djellal) sur RN46A au PK 76+400, Département Génie Civil et Hydraulique, Université Mohamed Khider - Biskra. p. 193.
- [9] Mazouz F. (2015), Le renouvellement du patrimoine bâti vétuste en Algérie. Le cas du centre-ville d’Oran. Droit et société, N° 89(2015/1), pp. 151-170, Algérie.
- [10] Ministère de l’Habitat et d’Urbanisme et de la ville (2022), Les livraisons du programme quinquennal 2015- 2019., Available from: <https://www.mhuv.gov.dz/fr/les-livraisons-du-programme-quinquennal-2015-2019>.
- [11] Ministère des Travaux Publics, Direction des Routes et ouvrages d’art (2021), Rapport statistique des ponts en Algérie, 240 pages, Alger, Algérie.
- [12] Direction des Routes, Ministère des Travaux Publics (2010), Règlement Parasismique Algérien des Ouvrages d’Art (RPOA 2008), Alger, Algérie.
- [13] Abdessemed M., Kenai S., Attar A. & Kibboua A. (2008), Maintenance and Rehabilitation-Program for Algerian Bridges, 11<sup>th</sup> DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components ‘‘Globality and Locality in Durability’’, Istanbul, Turkey, May 11-14.
- [14] Bernat E. and Gil L. (2013), Aided Diagnosis of Structural Pathologies with an Expert System; Advances in Structural Engineering, 16(2), pp: 379-393. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.16.2.379>
- [15] Gagg C.R. (2014), Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis, Engineering Failure Analysis, Vol.40, pp. 114-140. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>
- [16] Daniyal M. & Akhtar S. (2020), Corrosion assessment and control techniques for reinforced concrete structures: a review. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 5(1), pp. 1-20. <https://doi>

- [17] Otieno M., Beushausen H. and Alexander M. (2011), Prediction of corrosion rate in reinforced concrete structures – a critical review and preliminary results, *Materials and Corrosion*, Vol.63, Issue 9, pp.777-790. <https://doi.org/10.1002/maco.201106282>
- [18] Hariche L., Ballim Y., Bouhicha M. and Kenai S. (2012), Effects of reinforcement configuration and sustained load on the behaviour of reinforced concrete beams affected by reinforcing steel corrosion, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 34, Issue 10, pp. 1202-1209. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.07.010>
- [19] Li F. & Yuan Y. (2013), Effects of corrosion on bond behavior between steel strand and concrete, *Const. and Buil. Mater.*, Vol. 38, pp. 413-422. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.008>
- [20] Zhang W. & Yuan H. (2014), Corrosion fatigue effects on life estimation of deteriorated bridges under vehicle impacts, *Engineering Structures*, Vol. 71, pp. 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.04.004>
- [21] Chris L. (2001), The Collapse of the Silver Bridge, *West Virginia Historical Society quarterly*, Volume XV, N°. 4 October, 2001, USA.
- [22] Merah A. and Krobba B. (2017), Effect of the carbonatation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. Issue 1, pp. 874-886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.098>
- [23] Lima H.J.N, Ribeiro R.S., Palhares R.A. & Melo G.S.S.A. (2020), Analysis of pathological manifestations of concrete in urban overpasses, *Revista ALCONPAT*, Vol.9, N°2. <https://doi.org/10.21041/ra.v9i2.308>
- [24] Godart B. (2017), Pathologies des ouvrages en béton armé et béton précontraint, Polycopié de Cours du Module: ‘Maintenance, pathologie et réparation des ouvrages’; Mastère Génie Civil Européen., 125 Pages, Département de Génie Civil et Construction, École nationale des ponts et chaussées, France.
- [25] Mahut B. (2017), Pathologie, durabilité et protection du béton armé, Polycopié de Cours Module : ‘Maintenance, pathologie et réparation des ouvrages; Mastère Génie Civil Européen, 117 pages, Département de Génie Civil et Construction, École nationale des ponts et chaussées.
- [26] Boutarra Z. (2019), Pathologies et réhabilitation des ponts, Polycopié de Master Travaux Publics, Spécialité : Voies et Ouvrages d’Art, 116 pages, Faculté de génie civil et d’architecture, Université Hassiba Ben Bouali (Chlef), Algérie.
- [27] Kayondo M., Combrinck R. and Boshoff W.P. (2019), State-of-the-art review on plastic cracking of Concrete, *Construction and Building Materials*, Vol.225, pp. 886-899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.197>
- [28] Roy S., Unobe I. and Sorensen A.D. (2021), Vehicle-Impact Damage of Reinforced Concrete Bridge Piers: A State-of-the Art Review, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 35(5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001613](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001613)
- [29] Agence Qualité Construction (AQC), (2019), Corrosion des armatures du béton armé en façades des bâtiments, Fiches pathologie bâtiment, Référence B-05, Fondation EXCELLENCE SMA, France.
- [30] SIKA (2018), The repair and protection of reinforced concrete with Sika, in accordance with european standards EN 1504. Brochure. 51 pages. UK.. <https://gbr.sika.com/content/dam/dms/gb01/b/Concrete>
- [31] Heiza Kh., Nabil A., Meleka N. and Tayet M. (2014), State-of-the Art Review: Strengthening of Reinforced Concrete Structures – Different Strengthening Techniques, Sixth international Conference on Nano Technology in Construction, Egypt (NTC 2014).
- [32] Inge W., Nugroho S. and Njo H. (2018), Strengthening method of concrete structure, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 126 (2018) 012051. <https://org.doi.10.1088/1755-1315/126/1/012051>
- [33] Berthelot J.M. (2012), (Livre), Matériaux Composites (5<sup>ème</sup> Edition), Comoprtement mécanique et analyse des structures, 638 pages, Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, Le Mans, France.

- [34] SGL-Carbon (2022), Carbon Fibers and Carbon Fiber-Reinforced Plastic (CFRP), Available from: <https://www.sglcarbon.com/en/carbon-fibers-and-cfrp>.
- [35] Gay D. & Hoa S.V. (2007), (Book), Composites Materials, Design and Application (2<sup>nd</sup> Edition), Pages 568, ISBN9780429148248. <https://doi.org/10.1201/9781420045208>
- [36] Ozkan D., Gok M.S. & Karaoglanli A.C. (2020), Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability, Engineering Design Applications III, Andreas Öchsner, A., Altenbach, H., Eds., Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2020; pp. 235–253.
- [37] Balaguru P., Nanni A. and Giancaspro J. (2009), (Book), FRP Composites for Reinforced and Prestressed Concrete Structures, (1st Edition), Pages 316. <https://doi.org/10.1201/9781482288537>
- [38] Peijs T., Kirschbaum R. and Lemstra P.J. (2020), Chapter 5: A critical review of carbon fiber and related products from an industrial perspective, Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, Vol.5, Issue 2, pp. 90-106. <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.03.008>
- [39] Sen R. (2003), Advances in the application of FRP for repairing corrosion damage. Progress in Structural Engineering and Materials 5(2), pp.99-113.
- [40] Maheswaran J., Chellapandian M. and Arunachalam N. (2022), Retrofitting of severely damaged reinforced concrete members using fiber reinforced polymers: A comprehensive review, Structures, Vol.38, pp.1257-1276. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.02.059>
- [41] 440.2R-17 (2017), (Report), A. Guide for the design and construction of externally bonded FRP system for strengthening concrete structures, reported by ACI commette 440, Farmington Hills, pages 45.
- [42] Bacon R. (1960), Growth, Structure, and properties of graphite whiskers. Journal of applied physics, 31(2), pp.83-290. <https://doi.org/10.1063/1.1735559>
- [43] Oberlin A., Endo M. and Koyama T. (1976), Filamentous growth of carbon through benzene decomposition. Journal of crystal growth, 32(3): p. 335-349. [https://doi.org/10.1016/0022-0248\(76\)90115-9](https://doi.org/10.1016/0022-0248(76)90115-9)
- [44] Iijima S. (1991), Helical microtubules of graphitic carbon. Nature, Vol.354, pp. 56 - 58. <https://doi.org/10.1038/354056a0>
- [45] Torres Dials A.C. and al. (2017), From mesoscale to nanoscale mechanics in single-wall carbon nanotubes, Carbon, 123: p. 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.07.036>
- [46] Goze-Bac, C. (2010), NMR studies of carbon nanotubes and derivatives, Presentation HDR of dissertation, University of Montpellier (South of France). HAL Id: tel-00550837 <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00550837>
- [47] Zhang S.S., Ke Y., Smith S.T., Zhu H.P. and Wang Z.L. (2021), Effect of FRP U-jackets on the behaviour of RC beams strengthened in flexure with NSM CFRP strips. Composite Structures, Vol. 256 (113095). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113095>
- [48] Slaitas J. and Valivonis J. (2021) , Concrete cracking and deflection analysis of RC beams strengthened with prestressed FRP reinforcements under external load action, Composite Structures, Vol.255 (113036). <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113036>
- [49] Ali H., Assih J. and Li A. (2021), Flexural capacity of continuous reinforced concrete beams strengthened or repaired by CFRP/GFRP sheets, International Journal of Adhesion and Adhesives, Vol.104 (102759). <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102759>
- [50] Li J. (2020), Study on Bearing Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened With Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheet. The International Journal of Multiphysics, 14(4), pp. 389-398. <https://doi.org/10.21152/1750-9548.14.4.389>
- [51] Abdullah S.R., et al. (2020), Modified Epoxy for Fibre Reinforced Polymer Strengthening of Concrete Structures, International Journal of Integrated Engineering, 12(9), pp.103-113.

- [52] Singh N.P., Gupta V.K. and Singh A.P. (2019), Graphene and carbon nanotube reinforced epoxy nanocomposites, A review. *Polymer*, Vol. 180 (121724). <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2019.121724>
- [53] Liu S. et al. (2018), A review of extending performance of epoxy resins using carbon nanomaterials, *Composites Part B: Engineering*, Vol.136, pp.197-214. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.08.020>
- [54] Jin, F.-L., Li X. and Park S.J. (2015), Synthesis and application of epoxy resins: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, Vol. 29, pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.03.026>
- [55] Jiang W., Jin F.L and Park S.J. (2012), Thermo-mechanical behaviors of epoxy resins reinforced with nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 18(2), pp. 594-596.
- [56] Kim K.S. et al. (2010), Rheological behaviors and mechanical properties of graphite nanoplate/carbon nanotube-filled epoxy nanocomposites. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*,. 16(4), pp. 572-576.
- [57] Liu Y.L. et al. (2004), Thermal stability of epoxy-silica hybrid materials by thermogravimetric analysis. *Thermochimica Acta*, 412(1), pp.139-147.
- [58] Ashrafi B. et al. (2011), Enhancement of mechanical performance of epoxy/carbon fiber laminate composites using single-walled carbon nanotubes. *Composites Science and Technology*, 71(13), pp. 1569-1578. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2011.06.015>
- [59] Feng Q.P. et al. (2011), Synthesis of epoxy composites with high carbon nanotube loading and effects of tubular and wavy morphology on composite strength and modulus. *Polymer*, 52(26), pp. 6037-6045.
- [60] Allaoui, A. et al. (2002), Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite. *Composites Science and Technology*, 62(15), pp.1993-1998.
- [61] Bai J.B. & Allaoui A. (2003), Effect of the length and the aggregate size of MWNTs on the improvement efficiency of the mechanical and electrical properties of nanocomposites—experimental investigation. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 34(8), pp.689-694.
- [62] Cheng Q.F. et al.(2010), Carbon nanotube/epoxy composites fabricated by resin transfer molding, *Carbon*, 48(1), pp.260-266. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2009.09.014>
- [63] Liu, Y. et al. (2016), High Performance Shape Memory Epoxy/Carbon Nanotube Nanocomposites. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(1), pp.311-320
- [64] Morshed S.A. et al. (2020), Durability of wet lay-up FRP bonded to concrete with nanomodified epoxy adhesives. *The Journal of Adhesion*, 96(13), pp.1141-1166.
- [65] Jojibabu, P., Zhang Y.X , Rider N. & Wang J.(2020), Mechanical performance of adhesive joints using high-performance nanocomposite adhesive material with carbon nanotube and triblock copolymer hybrids, *Composites Part B: Engineering*, Vol.186 (107813). <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107813>
- [66] Zielecki W. et al. (2017), Impact of multiwall carbon nanotubes on the fatigue strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol.73, pp.16-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.11.005>
- [67] Jojibabu P. et al. (2016), Effect of different carbon nano-fillers on rheological properties and lap shear strength of epoxy adhesive joints, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol.82, pp.53-64. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.12.003>
- [68] Srivastava V.K. (2011), Effect of carbon nanotubes on the strength of adhesive lap joints of C/C and C/C–SiC ceramic fibre composites, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 31(6), pp. 486-489. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2011.03.006>
- [69] Bao C. et al.(2011), In situ preparation of functionalized graphene oxide/epoxy nanocomposites with effective reinforcements. *Journal of Materials Chemistry*, 21(35), pp.13290-13298.
- [70] Bindi Charmila T.K. et al. (2014), Microwave exfoliated reduced graphene oxide epoxy nanocomposites for high performance applications. *Polymer*, 55(16), pp. 3614-3627, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.05.032>

- [71] Baruah P. & Karak N. (2016), Bio-based tough hyperbranched epoxy/graphene oxide nanocomposite with enhanced biodegradability attribute, *Polymer Degradation and Stability*, Vol. 129, pp. 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.03.021>
- [72] Larsen R.M. & Jensen E.A. (2016), Epoxy–graphite oxide nanocomposites: Mechanical properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 133(26). <https://doi.org/10.1002/app.43591>
- [73] Atif R., Shyha I. & Inam F. (2016), The degradation of mechanical properties due to stress concentration caused by retained acetone in epoxy nanocomposites, *Rsc Advances*, 6(41), pp. 34188-34197.
- [74] Chandrasekaran S., Seidel C. & Schulte K. (2013), Preparation and characterization of graphite nano-platelet (GNP)/epoxy nano-composite: Mechanical, electrical and thermal properties, *European Polymer Journal*, 49(12), pp.3878-3888.
- [75] Eksik O. et al.(2016), Nanocomposites of a Cashew Nut Shell Derived Epoxy Resin and Graphene Platelets: From Flexible to Tough, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(3), pp. 1715-1721.
- [76] Kumar A. et al.(2016), Graphene-like nanocarbon: An effective nanofiller for improving the mechanical and thermal properties of polymer at low weight fractions, *Composites Science and Technology*, Vol.127, pp. 79-87.
- [77] Guadagno L. et al., Graphene-based structural adhesive to enhance adhesion performance. *RSC Advances*, 2015. 5(35), pp. 27874-27886.
- [78] Hosur M. et al. (2017), Mechanical and viscoelastic properties of epoxy nanocomposites reinforced with carbon nanotubes, nanoclay, and binary nanoparticles, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 36(9), pp.667-684.
- [79] Jiang D. et al. (2017), Mechanical properties of carbon fiber composites modified with graphene oxide in the interphase, *Polymer Composites*, 38(11), pp. 2425-2432.
- [80] Monfared Zanjani J.S. et al. (2016), Nano-engineered design and manufacturing of high-performance epoxy matrix composites with carbon fiber/selectively integrated graphene as multi-scale reinforcements, *RSC Advances*, 6(12), pp.9495-9506.
- [81] Salimi N.M., Torabi Merajin M. and Besharati Givi M.K. (2017), Enhanced mechanical properties of multifunctional multiscale glass/carbon/epoxy composite reinforced with carbon nanotubes and simultaneous carbon nanotubes/nanoclays, *Journal of Composite Materials*, 51(6), pp. 745-758.
- [82] Wang C. et al. (2015), Microstructure and properties of carbon fiber sized with pickering emulsion based on graphene oxide sheets and its composite with epoxy resin. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(29). <https://doi.org/10.1002/app.42285>
- [83] Zhang Z. et al. (2016), Synergetic effects on the mechanical and fracture properties of epoxy composites with multiscale reinforcements, Carbon nanotubes and short carbon fibers, *Journal of Applied Polymer Science*, 133(22). <https://doi.org/10.1002/app.43500>
- [84] Irshidat M.R. & Al-Saleh M.H (2016), Effect of using carbon nanotube modified epoxy on bond–slip behavior between concrete and FRP sheets, *Construction and Building Materials*, Vol. 105, pp. 511-518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.183>
- [85] Irshidat M.R. & Al-Saleh M.H (2017), Flexural strength recovery of heat-damaged RC beams using carbon nanotubes modified CFRP, *Construction and Building Materials*,. Vol. 145, pp. 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.047>
- [86] Irshidat M.R., Al-Saleh M.H and Almashagbeh H. (2016), Effect of carbon nanotubes on strengthening of RC beams retrofitted with carbon fiber/epoxy composites, *Materials & Design*, Vol. 89: pp. 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.166>
- [87] Irshidat M.R. and Al-Husban R.S. (2022), Effect of bond enhancement using carbon nanotubes on flexural behavior of RC beams strengthened with externally bonded CFRP sheets. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 16(1), pp.131-143. <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0787-8>
- [88] Sika France SA (2016), Avis Technique 3/16-875, Sika CarboDur® SikaWrap®, Groupe spécialisé : 3.3 - Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondation et d'infrastructure, 24 pages, France.

- [89] Abdessemed M. (2003), Comportement des poutres renforcées par des matériaux composites à base de fibres de carbone, Mémoire de Magister, Département de Génie Civil, Université de Blida1, Algérie.
- [90] Laichaoui A. (2006), Analyse expérimentale du comportement des poutres en béton armé renforcées par matériaux composites, Mémoire de Magister, École Nationale Polytechnique, Algier, Algérie.
- [91] Qissab M.A. & Abbas S.T. (2016), Behaviour of reinforced concrete beams with multiwall carbon nanotubes under monotonic loading, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22(9). <http://doi.org/10.1080/19648189.2016.1232661>.
- [92] Yousfi S., Nouri L., Saidani M. & Hadjab H. (2014), The use of the Dreux-Gorisse Method in the preparation of concrete mixes: An automatic approach, *Journal: Asain Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, Vol. 15, N° 1, pp. 79-93.
- [93] Afnor Editions, Norme NF EN 933-1 (2012) Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, partie 1: Détermination de la granularité-analyse granulométrique par tamisage. Norme Française, Paris, France.
- [94] Afnor Editions, NF EN 1097-6 (2014), Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats-Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau. Norme Française, Paris, France.
- [95] Afnor Editions NF EN 1097-2 (2020), Nouvelle version, Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, Partie 2, Norme Française, Paris, France.
- [96] Norme CEN, PREN 933-8 (2015), Tests for Geometrical Properties of Aggregates—Part 8: Assessment of Fines—Sand Equivalent Test. European Committee for Standardization, 16 Pages. SLOVENSKI Standard.
- [97] Afnor Editions NF EN 933-8+A1 (2015), Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats Partie 8 : Évaluation des fines - Équivalent de sable, Norme Française, Paris, France.
- [98] Afnor Editions NF EN 1097-6 (2022), Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau, Norme Française, Paris, France.
- [99] Lafarge Algérie (2013), Matine- Ciment Portland au Calcaire (NA442 CEM II/A-L 42,5 N), [https://www.lafarge.dz/sites/algeria/files/documents/fp\\_new\\_matine\\_fr.pdf](https://www.lafarge.dz/sites/algeria/files/documents/fp_new_matine_fr.pdf)
- [100] Dreux G. & Festa J. (1995), (Livre). Nouveau guide du béton: composants et propriétés, composition et dosage, fabrication, transport et mise en oeuvre, contrôle et normalisation: Eyrolles.
- [101] Afnor Editions NF EN 206/CN (2014), Béton-Spécification, performance, production et conformité-Complément national à la norme NF EN 206, Norme Française, La Plaine St-Denis, France.
- [102] Sika El Djazair Documents et Ressources (2020), Notices techniques/ Distribution, Route de Larbaa, Les Eucalyptus, Algérie. <https://dza.sika.com/fr/documents-ressources/notices-techniques.html>.
- [103] Sika El Djazair (2020), Notice Produit : Sika® CarbDur® S - Lamelles pultrudées à base de fibres de carbone pour le renforcement de structures. <https://dza.sika.com/content/dam/dms/dz01/5/sika-carbodur-s.pdf>.
- [104] Sika Al Djazair (2020), Notice produit Sikadur®-30 Adhésif structural pour le collage de renforts PRFC ou plats métalliques. <https://dza.sika.com/content/dam/dms/dz01/c/sikadur-30.pdf>.
- [105] Beijing\_Beike\_New\_Material\_Technology\_Co\_Ltd.(2019),Unfunctionalized/hydroxylated/carboxylated high-quality multi-walled carbon nanotubes, diameter 5-15nm. Retrieved from <http://www.nanomxenes.com/bocpen.php?id=5763>.
- [106] Barabashko M., Ponomarev A., Rezvanova A., Kuznetsov V. & Moseenkov, S. (2022). Young's Modulus and Vickers Hardness of the Hydroxyapatite Bioceramics with a Small Amount of the Multi-Walled Carbon Nanotubes. *Materials*, 15 (15), 5304. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/15/5304>.

- [107] Sika Al Djazair (2021), Sikadur®-52 Injection LP, Résine d'injection à faible viscosité. <https://dza.sika.com/fr/construction/reparation-du-beton/sikadur-52-injectionlp.html>.
- [108] MATEST C090-07N. (2017), Concrete flexural machine 200 kN automatic, Servo-plus evolution. <https://www.matest.com/en/product/c090-07n-concrete-flexural-machine-automatic>.
- [109] MATEST C070D (2017), Concrete compression machine 3000 kN semi-automatic, Digitec. <https://www.matest.com/en/product/c070d-concrete-compression-machine-semi-automatic>.
- [110] Hadwan H.H. and Reddy Y.P.(2016), Smart Home Control by using Raspberry Pi & Arduino UNO, International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering (IJARCCE), Vol.5, Issue 4, pp. 283-288. <https://doi.org/10.17148/IJARCCE.2016.5473>.
- [111] Bocquet R., Cuisset A., Kulinski P., Masselin P., Montagnier W. & Sadovskii C.D. (2022), Enseignement autour de micro-contrôleur Arduino Uno, Université du Littoral – Côte d'Opale, 2me et 3me année Licence MSPI, Département de physique. <http://pca3.univ-littoral.fr/~dima/cours/Arduino/BQE-Arduino.pdf>.
- [112] Bouquet F. & Bobroff J. (2015), (Cours), MicroContrôleur Arduino, Projets de physique statistique, Magistère de physique fondamentale, Université Paris Sud, 22 pages. <http://playground.arduino.cc/French/Reference>.
- [113] Calvi J.P. (2014), Analyse numérique, Polycopié de Cours et Exercices, UPS Université de Toulouse, 147 pages, France.
- [114] Bennegadi M.E (2014), Modèle numérique pour l'étude du comportement d'interface des structures renforcées par plaque en composite, Thèse de Doctorat en sciences, Faculté de génie mécanique, Département de génie mécanique, Université de science et de technologie d'Oran (USTO), 141 pages, Algerie.
- [115] Ansys Inc (2022), Site web officiel rubrique produits. <https://www.ansys.com/products>.
- [116] Saba A. & Qurrat ul A. (2015), Newton Raphson Method, International Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 6, Issue 7, ISSN 2229-5518, pp: 1748-1752. <http://www.ijser.org>.
- [117] Société Freyssinet, Avis technique 3/14-757\*V2, Foreva TFC, Groupe Spécialisé n° 3.3, Structures tridimensionnelles, ouvrages de fondations et d'infrastructure, 45 pages, Secrétariat de la commission des Avis Techniques, CSTB, France.
- [118] Abdessemed M., Kenai S., Bayasli R. et Messelka R. (2005), Application des matériaux composites à base de fibres de carbone sur les poutres de ponts en Algérie, Colloque International CMEDIMAT 2005, Oran – Algérie, 06 et 07 Décembre.
- [119] Sapta, Département des études et Contrôle (2017), Rapport de Diagnostic du pont oued Hachem (Tipaza), 40 pages, BET Oued Smar, Alger, Algérie.
- [120] ANSYS Inc (2022), "ANSYS Mechanical APDL Theory Reference", Release 22.2.
- [121] Kheyroddin A. & Naderpour H. (2008), Nonlinear finite element analysis of composite RC shear walls, Iranian Journal of Science and Technology Transcation B Engineering, Vol.32, Issue B2, pp:79-89.
- [123] Siddiqui N.A (2009), Experimental investigation of RC beams strengthened with externally bonded FRP composites, Latin American Journal of Solids and Structures 6 (2009) pp: 343 – 362.
- [124] Liu T.X and al. (2004), Morphology and Mechanical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6, Composites, Macromolecules, 37(19), pp.7214-7222. <https://doi.org/10.1021/ma049132t>.
- [125] Hafedh A.A. and al. (2020), Nonlinear Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with Steel Fibers Using ANSYS. Solid State Technology, ISSN: 0038-111X Vol. 63, No. 1..
- [126] Cival K.O., and al. (2021), Forced Vibration Analysis of Composite Beams Reinforced by Carbon Nanotubes. Nanomaterials, 11(3), 571. <https://doi.org/10.3390/nano11030571>.

## **ANNEXE**

Code C++ pour le fonctionnement du capteur déplacements via Arduino.

---

```

#include <ezButton.h>
#include <RTCLib.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Adafruit_ADS1X15.h>

#define DHTPIN 3 // Digital pin connected to the DHT sensor dht DHT11; //Sensor
object named as DHT
#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11

#define LOOP_STATE_STOPPED 0
#define LOOP_STATE_STARTED 1
ezButton button(2); // create ezButton object that attach to pin 2;s
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

RTC_DS1307 RTC;

Adafruit_ADS1115 ads;

int loopState = LOOP_STATE_STOPPED; //button state
int samplingfreq; //sampling frequency [milliseconds]
float average = 0; //mean of max sensor readings
float distance = 0; //for the calibrated distance
float adcRead; //for the raw data
float ref; //first reading from sensor
unsigned long int milli_time;
float h; //Humidity
float t; //Temperature as Celsius (the default)
const char filename = "Disp.txt"; //file name
const int OUTPUT_PIN = 4; //reset

File dataFile;

DateTime now;

// the setup routine runs once when you press reset:

void setup(void)
{
  // initialize serial communication at 250000 bits per second:
  Serial.begin(250000);

  //-----Taking care of LCD-----
  //NOTE: if you cannot see the text on the LCD, try to change the potmeter on
the back of it.
  //Sometimes you just have wrong contrast settings and nothing shows up on the
screen because of it.
  lcd.begin(16, 2); // initialize the lcd
  lcd.backlight(); //initialize backlight
  lcd.clear(); //clear the LCD
  lcd.setCursor(0, 0); //Defining positon to write from first row,first column
.
  lcd.print(" KTR - 100 mm"); //some message
  lcd.setCursor(0, 1); //Cursor is moved to the 2nd line of the LCD

```



---

```

    lcd.clear(); //clear the LCD
    lcd.setCursor(0, 0); //Defining positon to write from first row,first column
.
    lcd.print("SD Card failed"); //some message
Restart:
    delay(3000);
    digitalWrite(OUTPUT_PIN, LOW);
    for (;;)
    }

RTC.begin();
//check or the Real Time Clock is on
if (! RTC.isrunning() ) {
    Serial.println("RTC is NOT running!");
    // following line sets the RTC to the date & time this sketch was compiled
    // uncomment it & upload to set the time, date and start run the RTC!
    RTC.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
}

//-----Initializing SD Card-----
// open the file. note that only one file can be open at a time,
// so you have to close this one before opening another.

//write down the date (year / month / day)
//prints only the start, so if the logger runs for sevealn days you only findt
the start back at the begin.
now = RTC.now();
dataFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);
dataFile.print("Start logging on: ");
dataFile.print(now.year(), DEC);
dataFile.print('/');
dataFile.print(now.month(), DEC);
dataFile.print('/');
dataFile.print(now.day(), DEC);
dataFile.print(":");
dataFile.print(now.hour(), DEC);
dataFile.print(":");
dataFile.print(now.minute(), DEC);
dataFile.print(":");
dataFile.print(now.second(), DEC);
dataFile.println("\n"); //linebreak
dataFile.print("Time [Sec]");
dataFile.print(",");
dataFile.print("Displacement [mm]");
dataFile.print(",");
dataFile.print("Temperature [C°]");
dataFile.print(",");
dataFile.print("Humidity [%]");

dataFile.close();

button.setDebounceTime(50); // set debounce time to 50 milliseconds

// Calibration
for (int i = 0; i < 16; i++) {
    ref = ads.readADC_Differential_2_3();
    average = average + ref;
}
average = average / 16;

```

```

// PLX-DAQ
Serial.println("CLEARDATA"); //clears up any data left from previous projects
Serial.println("LABEL,Computer Time,Time (Milli Sec.),Displacements
(mm),Temperature (C°),Humidity (%)"); //always write LABEL, to indicate it as
first line
}

// the loop routine runs over and over again forever:

void loop(void) {

  unsigned long int startTime = millis(); //define the time NOW. This will be
useful when we need some time readings

  button.loop(); // MUST call the loop() function first

  if (button.isPressed()) {

    milli_time = millis();

    if (loopState == LOOP_STATE_STOPPED)
      loopState = LOOP_STATE_STARTED;
    else // if(loopState == LOOP_STATE_STARTED)
      loopState = LOOP_STATE_STOPPED;
  }

  if (loopState == LOOP_STATE_STARTED) {

    //-----
    unsigned long int elapsedTime = millis() - milli_time; //start another timer

    adcRead = ads.readADC_Differential_2_3(); //read the ADC 2 and 3 pins in
differential mode

    // in case the sensor value is outside the range seen during calibration
    adcRead = constrain(adcRead, 3, average);

    // apply the calibration to the sensor reading
    adcRead = map(adcRead, 3, average, 0, average);

    distance = ((100 / average) * adcRead); //calibrated displacement

    // Read Humidity
    h = dht.readHumidity();

    // Read temperature as Celsius (the default)
    t = dht.readTemperature();

    //-----LCD Printout-----
    lcd.clear(); //clear LCD
    lcd.setCursor(0, 0); //Defining positon to write from first row,first column
.
    lcd.print("Displacement");
    lcd.setCursor(0, 1); //Defining positon to write from second row,first column
.

    lcd.print(distance, 8); //You can write 16 Characters per line
    //-----

    //-----Writing on SD Card-----

```

---

```

// open the file. note that only one file can be open at a time,
// so you have to close this one before opening another.

dataFile = SD.open(filename, FILE_WRITE);

// if the file is available, write to it:
// log the temperature and time.
if (dataFile) {

    dataFile.print("\n"); //linebreak

    dataFile.print(elapsedTime);
    dataFile.print(",");

    dataFile.print(distance);
    dataFile.print(",");

    dataFile.print(t);
    dataFile.print(",");

    dataFile.print(h);

    dataFile.close();

}

if the file isn't open, pop up an error:
else {
Serial.print("\n"); //linebreak
Serial.println("error opening Disp.txt");
}

//-----Writing on Excel File-----
-----

// PLX-DAQ
Serial.print("DATA,TIME"); //always write "DATA" to Indicate the following
as Data
Serial.print(","); //Move to next column using a ","

Serial.print(elapsedTime); //Store elapsed time on Excel
Serial.print(","); //Move to next column using a ","

Serial.print(distance); //Store displacement on Excel
Serial.print(","); //Move to next column using a ","

Serial.print(t); //Store temperature on Excel
Serial.print(","); //Move to next column using a ","

Serial.print(h); //Store humidity on Excel
Serial.print(","); //Move to next column using a ","

Serial.println(); //End of Row move to next row

delay(11);
}
}

```

---

# TABLE DES MATIERES

DEDICACES

REMERCIEMENTS

RESUMES (Arabe, Français, Anglais)

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ILLUSTRATIONS GRAPHIQUES ET TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>I. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>4</b>
I.1 INTRODUCTION .....	4
I.2 PATRIMOINE DES STRUCTURES EN ALGERIE.....	5
I.2.1 <i>Secteur de l'Habitat</i> .....	5
I.2.2 <i>Secteur des Travaux Publics</i> .....	5
I.2.3 <i>Répartition des Ponts en Algérie</i> .....	5
I.3 REPARATION DES STRUCTURES EN BETON ARMEE.....	7
I.3.1 <i>Pathologies des Constructions</i> .....	7
I.3.2 <i>Type D'endommagements Des Structures</i> .....	7
I.3.3 <i>Causes D'endommagements Des Structures En Béton</i> .....	9
I.3.4 <i>Méthodes De Réparation Et De Renforcement Des Structures En Béton</i> .....	13
I.3.5 <i>Les Matériaux Composites Comme Matériau De Réparation Innovant</i> .....	17
I.4 COMPOSITES A BASE DE POLYMERES.....	18
I.4.1 <i>Généralités</i> .....	18
I.4.2 <i>Types De Composites</i> .....	20
I.4.3 <i>Généralités Des Composites</i> .....	25
I.5 HISTORIQUE ET GENESE D'APPLICATION.....	33
I.5.1 <i>La Réparation et/ou Renforcement Des Structures En Béton Par Composites</i> .....	28
I.5.2 <i>L'amélioration de la résine (matrice) par ajout des nano charges</i> .....	31
I.5.3 <i>L'utilisation des résines époxy modifiés par nanomatériaux pour le renforcement</i> .....	41
I.6 CONCLUSION.....	44

---

<b>II. MATERIAUX, ESSAIS ET PROCEDURES EXPERIMENTALES .....</b>	<b>45</b>
II.1 INTRODUCTION.....	45
II.2 PROGRAMME EXPERIMENTAL DES POUTRES .....	45
II.2.1 Caractérisation des Matériaux .....	46
II.2.2 Instrumentation et Appareil de Mesure.....	61
II.2.3 Préparation des Spécimens d'Essai.....	64
II.2.4 Essai sur Poutres BA Renforcées par CFRP Sans Endommagement.....	69
II.2.5 Essai sur Poutres BA Réparées par CFRP Après Endommagement.....	70
<b>III. ANALYSE NUMERIQUE ET CHOIX DU LOGICIEL.....</b>	<b>72</b>
III.1 INTRODUCTION.....	72
III.2 LOGICIEL DE MODELISATION .....	72
III.3 METHODE D'ANALYSE NON LINEAIRE .....	75
III.4 MODELISATION DES ELEMENTS EN BETON ARME RENFORCES .....	76
III.4.1 Modélisation des éprouvettes d'essai renforcées par CFRP et CNTs.....	77
III.4.2 Modélisation des poutres renforcées par CFRP et CNTs.....	86
III.4.3 Modélisation des poutres de tablier de pont renforcées par CFRP et CNTs.....	90
<b>IV. RESULTATS ET DISSCUSSIONS.....</b>	<b>98</b>
IV.1 INTRODUCTION.....	98
IV.2 RESULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE.....	98
IV.2.1 Essai d'adhérence « Pull Off Test » .....	98
IV.2.2 Essai de Flexion sur les poutres en BA.....	99
IV.3 ANALYSE MODALE DU PONT RENFORCE.....	105
IV.3.1 Principe.....	105
IV.3.2 Modélisation du Pont Sans Renforcement .....	106
IV.3.3 Modélisation du Pont par Matériaux Composites Traditionnels .....	109
IV.3.4 Modélisation du Pont avec insertion des nano composites .....	109

---

---

<i>IV.3.5</i> Discussion et Commentaires.....	110
<b>CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>111</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>113</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>121</b>
<b>TABLE DES MATIERES.....</b>	<b>126</b>

**PUBLICATION  
INTERNATIONALE**

# STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOR OF CONCRETE STRUCTURES REINFORCED WITH NANOTUBES MODIFIED COMPOSITES

**OUADAH NOUREDDINE<sup>1</sup>, ABDESSEMED MOULOUD<sup>2\*</sup>, KECHOUANE FOUAD<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Laboratory of Geo-Materials and Civil Engineering, Department of Civil Engineering, University of Blida1, Soumaa Road – P.O.Box 270, 250320 - Blida, Algeria

<sup>2</sup>Laboratory of Geo-Materials and Civil Engineering (LGMCE), Department of Civil Engineering, University of Blida1, Soumaa Road – P.O.Box 270, 25032 - Blida, Algeria.

*The use of composites for the reinforcement of concrete structures, sometimes poses the problem of the detachment of the composite plates/fibers from the surface of the concrete support, especially in arid or dry climates. This phenomenon of disbonding, due to the poor performance of the matrix (adhesive glue), affects nearly 8% of the structures reinforced with FRP in Algeria and negatively influences the durability and bearing capacity of the reinforced structure over time. This article presents the results of a study on reinforced concrete structures. It concerns the insertion of carbon nanotubes (CNT) in epoxy resin, used as an adhesive for CFRP composites. The objective is to evaluate the improvement of the mechanical performances of the resin used and to contribute to reduce the phenomenon of disbonding. An experimental work carried out on a set of reinforced concrete beams, strengthened by CFRP plates, with the insertion of carbon nanotube powders (CNT) in the resin used, with percentages varying from 0 to 2%, has been performed. To validate the results obtained, a numerical work based on the finite element method was developed taking the case of a concrete bridge requiring repairs. The results showed that the nano-composites (CNTs) improve the mechanical performance of the epoxy resin and bring an appreciable gain of the order of 50 to 170% to the constraints. Moreover, this technique of moderation of composites by adding nanotubes (CNTs), gives an appreciable gain at vibration frequencies. This was confirmed by the results of the modal analysis of the bridge structure repaired with 2% addition of CNTs.*

**Keywords:** Concrete, reinforcement, composite, adhesive, nanotube, disbonding, frequency, analysis, structure

## 1. Introduction

Over the last decades, the use of fiber reinforced polymers (FRPs) in civil engineering applications has become very remarkable. Especially considering that many civil engineering structures (buildings, bridges, other structures) are old and represent an important heritage requiring repair and/or reinforcement [1]. External bonding of fiber-reinforced polymer (FRP) sheets with epoxy resin is an effective technique for strengthening and repairing reinforced concrete beams, slabs and bearings (RCB) under static, dynamic or moving loads. However, this resin, due to its limited mechanical performance, compared to polymer fibers, represents the weak point and causes tearing and debonding of the composites from their support. It is becoming increasingly necessary to find remedies to eliminate the phenomenon of composite tearing, knowing that in more than 300 bridges, this phenomenon is apparent, especially in areas of dry and hot climates. Several researchers have tried to find remedies to these anomalies and propose effective and reliable solutions, which do not influence the environmental conditions. Among these solutions are the "nano-composites", which designate a new class of compound materials, whose dimensions are nanometrics. These are achieved by dispersing in general, small amounts of

nano-reinforcement inside a polymer matrix to ensure a much larger exchange surface and a better distribution of stresses inside the nano-composite. The nano-renfort (carbon nanotube) located at the heart of a polymer matrix could be imagined as a group of cylindrical coaxials packed together, with uniform thickness interval [2]. The main causes that prompted researchers to think about the use of nanotubes in the matrix (resin) is the improvement of the mechanical performance of the matrix [3, 4], as they can be adapted to present excellent properties for potential application in the engineering of flexible pavements in civil engineering [5] or to prevent composite fibers (reinforcement) from detaching from the concrete support for the elements of repaired structures. Generally, the problems survived in this case of composite detachment figures, are observed in cases exposed to thermal gradients, excessive temperatures or tough environmental conditions. Experimental studies have been conducted to observe the influence of temperature on an epoxy resin matrix [6,7], especially when it is known that structures, such as bridges that are located in hot climates are always exposed to this problem. The phenomenon of debonding has been widely studied in recent years [8]. Indeed, specifically for reinforced concrete beams strengthened with steel plates [9, 10] or with plastic reinforcements (FRP) [11, 12] and this, in the

\*Autor corespondent/Corresponding author,  
E-mail: [abdesmoul@yahoo.fr](mailto:abdesmoul@yahoo.fr)

tensile parts of the flexural beam. These studies have shown that the modulus of elasticity and the amount of applied reinforcement excessively influence the stiffness of the FRP composite. Also, these studies have shown that the use of thin plates favors this debonding failure.

The reading of the literature shows that few (perhaps rarely) works have been carried out in cases of real scale structures, with application of FRP composites (inserted by carbon nano-tubes in their reinforcements) [13]. Indeed, the literature, has shown that, although a number of researchers have studied the use of nano-particles from a materials point of view [14], only a limited amount of research has been carried out to use nanotube matrices for civil structures [15 - 17]. For this reason, through this study, we will attempt to contribute to the generalization of the increase in mechanical performance of composite reinforcements by CNTs and ensure the durability and survival of structures repaired by composites. Studies of RC beam reinforcement, by composites with the addition of carbon nanotubes (CNTs), over the last 10 years, have shown the potential improvement in properties and performance of fiber-reinforced polymer matrix materials in which nano and micro scale particles have been incorporated. From the existing literature, considerable efforts have been made to synthesize and process these unique polymers, but relatively little work has been done on fiber-reinforced epoxy composites to improve its overall stiffness. Irshidat and al. [18] investigated the influence of using carbon nanotubes (CNTs) on the flexible strength recovery of heat-damaged RC beams repaired with carbon fiber reinforced polymer composites (CFRPs). It has also been shown that the use of CFRPs modified with carbon nanotubes to strengthen RC beams [19] and columns [20] improves the load carrying capacity of the confined columns and the flexural strength of the retrofitted beams.

The effect of multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) on the behavior of RC beams under monotonic loading has been studied by Qissab and al. [21]. The application of innovative constituents and materials that can significantly affect the mechanical behavior of concrete structures has been developed by M. Baccocchi [22]. It concerns the modeling and numerical study of the viscoelastic behavior of laminated concrete beams reinforced with CFRP strips and carbon nanotubes. Rousakis and al. [23] showed that concrete columns confined with glass fibers embedded in CNTs-modified epoxy have a higher load capacity than columns confined with glass fibers embedded in pure epoxy. Irshidat and al. showed that the pull-out bond strength between fiber reinforced polymer (FRP) rebar and concrete with carbon nanotubes (CNTs) is significantly improved as a function of the content of CNTs nanotubes [24]. In this paper, we present two parts: An experimental analysis in the laboratory,

with the preparation of twelve reinforced concrete beams (RC), of dimensions (1700-180-160) mm. whose configuration is as follows. Two control beams without reinforcement, two beams reinforced externally by laminated plates CFRP in traction with an equivalent epoxy glue. The other beams are reinforced by the same type of laminated plates CFRP in traction with epoxy glue, but with insertion of carbon powder nanotubes in percentage: 0.5% (for the first two beams), 1.0% (for two other beams) and 1.5% (for two identical beams) and 2.0% for the last two beams. The objective is to see the influence of the percentage of carbon nanotubes (CNTs) powders on the behavior of these beams tested in 4-point bending and thus see their effect on the stiffness of the reinforcement performed. In order to validate the results found experimentally, the second part consists in a numerical analysis by applying of the finite element method (FE). The application is taken for a case study in situ for an old bridge, whose beams are reinforced by composite materials, with insertion of carbon nanotubes, with the optimal percentage determined during the experimental results. A modal analysis, with a dynamic behavior, has been performed in order to determine the modes and the frequencies of vibration of the tested structure.

## 2. Experimental program

### 2.1 Tests to the laboratory

The tests discussed in this paper were carried out on simply supported RC beams reinforced in bending with laminate plates CFRP glued to the outside. The beams were tested in a four-point loading condition. The Sika-carbodur laminate plates are positioned at the lower fiber of the beam (Fig.1) and the measurement of stresses and deformations will be done using the P3500- Model SB10 portable extensor bridge (Fig.2). All beams were reinforced longitudinally (horizontally) with two steel bars of nominal diameter of 10mm (on top) and three steel bars 12mm (at the bottom) and with crossbars (stirrups) of nominal diameter of 6 mm spaced to 120 mm. The test program and details of the specimen are summarized in Table1, where (NC) refers to normal concrete, (RPC) refers to reference concrete, numbers 10, 12 refer to the longitudinal diameter of steel bar. The incorporation of carbon-nanotubes into epoxy, with the aim of improving the mechanical properties of epoxy, was made [25]. Low nanoparticles concentrations (CNTs) of 0.5%, 1%, 1.5% and 2%, were added with adequate mixture to have homogeneity in the epoxy resin used (Fig.3). The detail of the tested beams is illustrated in the Table1.

The adhesive glue is the Sikadur30, epoxy commercially available in Algeria incorporated multi-wall nano carbon tube (MWCNT), was used (Fig.3) [26]. The carbon nanotubes (CNTs) were



Fig.1 - Laminated plate located in the beam.



Fig.2 - Extensive bridge for deformation.



Fig.3 - The adhesive glue used.



Fig.4 - Nanotubes used as powders

Table 1

Details of the Tested Beams

Beam notation	Dimension (mm)	Flexural Reinforcement <sup>(a)</sup>	Composite	Ratio CNTs/resin
BC	(160×180×1700)	3D12	Laminate CFRP	-
BL	(160×180×1700)	3D12	Laminate CFRP	0%
BR1	(160×180×1700)	3D12	Laminate CFRP	0.5%
BR2	(160×180×1700)	3D12	Laminate CFRP	1%
BR3	(160×180×1700)	3D12	Laminate CFRP	1.5%
BR4	(160×180×1700)	3D12	Laminate CFRP	2%

**Note:** BC= Beam control, BL= Plain reinforcing by laminated plate CFRP.

BR1= Insertion 0.5% CNTs, BR2= Insertion 1.0% CNTs, BR3= Insertion 1.50% CNTs, BR4= Insertion 2.0% CNTs

<sup>(a)</sup>Three bars: 12-mm diameter is indicated by 3D12 (intense face).

used as a powder (Fig.4) form with an external diameter (20-30 nm). Surface treatment of MWCNT was done using a mixture of nitric and sulfuric acids to develop hydroxyl or carboxyl end groups on the outer surface of nanotubes [27]. The used CFRP laminate has a modulus of elasticity of 165 GPa and an ultimate tensile strength of 2800 MPa, while the used epoxy has a tensile strength and a modulus of elasticity of 30 MPa and 12.8 GPa, respectively, as reported by the manufacturer. The steel bars used have an ultimate resistance of 980 MPa. The CFRP laminated plates are of 80 × 1500 × 1.2 mm dimensions were used at the bottom of the beam [28, 29].

## 2.2. Measures and instrumentation

All the test beams were tested as part of a four-point loading system. The length and range of each beam was 1.70m and 1.50m and the distance between the loads was 0.6m. The loads acting on the tested beams were measured by a 600 kN load cell where, in several stages, each beam was loaded up to failure. A voltage gauge with a gauge length of 10 mm was mounted on the central pull bar in the bending span. Deformation gauges were also mounted on the lower part of the beam in its middle. The reading of the gauges was made by the use of the extended bridge which can withstand ten exits. These gauges used have the following

characteristics: Concrete gauge: R:120/0.3%, (Ohm), gauge factor: K: 2.07. Steel gauge: R:120/0.2% (Ohm), gauge factor: K:2.1.

## 2.3. Test Results

Looking at the evolution of the load with the rapture mode, we observed that for the control beam (BC), the first minimal flexural cracks were produced in the loading zone where the maximum bending moment is located. But suddenly, the shear cracks appeared, of which the major crack, appeared on the left side at a load of about 46.5 kN. The crack extended from the loading point to the support and, as the load progressed, a second inclined crack appeared on the right side with the presence of other minor vertical and ascending cracks. The beam ruptured at a load of about 84 kN. The main crack is inclined and the failure was fragile, it was less aggressive than in the case of all the other reinforced beams. For other reinforced beams. The same phenomenon is repeated, however with a slower time and the deviations of the values of the first cracking and failure loads are illustrated. All beams are classified as short beams due to the  $a/h$  value [30] (Fig.5). The major fracture crack was reported to be oblique in shape (45%) in each case. Table 2 gives all the values found for the different test beams.



Fig.5 - Major crack in the test beam BC

Table 2

Results values after the test.

Beam	Load/first crack (kN)	Major crack	Load/Rupture (kN)	Max/deformation $\mu\text{m}$	Ratio crack/rupture
BC	46.5	Tilted/45%	84.3	987.6	55.16
BL	73.4	Tilted/45%	90.0	1167.3	81.56
BR1	81.2	Tilted/45%	134.8	1186.7	60.02
BR2	87.4	Tilted/45%	157.6	1242.1	55.42
BR3	93.8	Tilted/45%	169.5	1342.5	55.34
BR4	100.23	Tilted/45%	184.7	1395.6	54.27

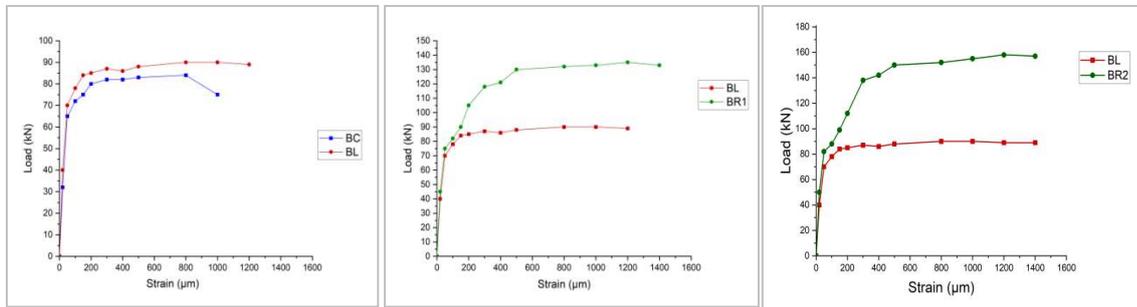


Fig. 6a - Load- strain curves BC-BL. Fig.6b - Load- strain curves BL-BR1. Fig.6c.- Load- strain curves BC-BR2.

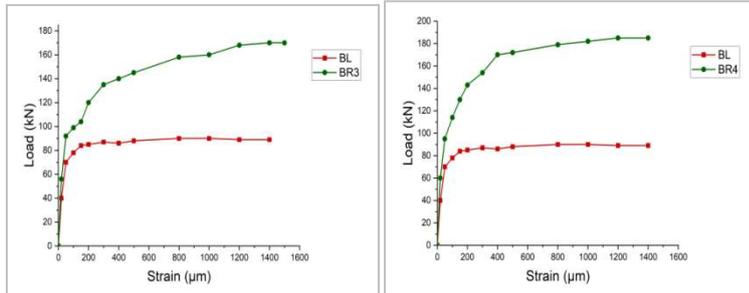


Fig.6d - Load- strain curves BL-BR3. Fig.6e - Load- strain curves BL-BR4.

CNTs are known for their high mechanical properties [31]. They have shown great potential in the reinforcement of carbon fiber composite materials (CFRP). This was confirmed by the results found in our study. Indeed, Figures: 6a, 6b, 6c, 6d and 6e, show that the reinforcement by composites influence the behavior of the beams and this influence is more precise depending on the participation rate of CNT nanotubes in the epoxy resin. As the rate increases, the load (stress) increases and the crack/break rate is reduced. Comparing the different types of reinforcement, with the percentage of inserted nanotubes (CNTs), we can see that the BR4 beam (2% CNTs) has more promising results with an increase in breaking load reaching the value of 184.5 kN, which represents a gain of 105% (Fig.6e), compared to 169.5 kN for the BR3 beam (1.5% CNTs), representing a gain of

88.34%, or 157.6 kN (BR2 beam-Fig. 6d) and 134.8 kN, representing gains of 75.11% and 49.78% (Figs.6c and 6b), respectively. These results confirm the interest of the insertion of nanotubes in the resin/matrix of the applied composite on the behavior of the beams and consequently on the stiffness of the reinforcement [25]. Regarding the ratio of the first cracks appearance force/breakage force, it shows that the percentage varies between 54% and 81%, with an appreciable reduction for the case of reinforcement of the composite modified by the addition of nanotubes (CNTs)/percentage of 2%. The value of 54.27%, gives an idea on the dissipated energy that is significantly reduced.

### 2.4 Numerical Simulation

Three-dimensional finite element (FE) models were generated using appropriate commercial

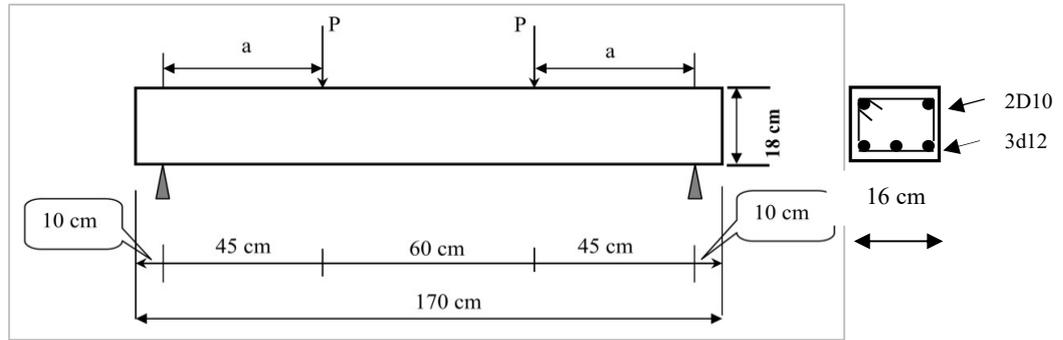


Fig. 7 - RC beam dimensions and reinforcements and loading configuration

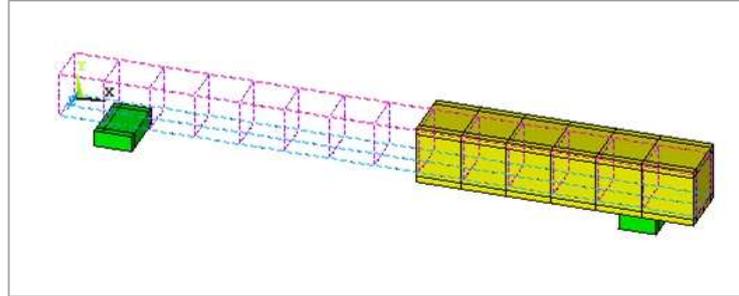


Fig. 8 - Finite element model of the beam with steel bars.

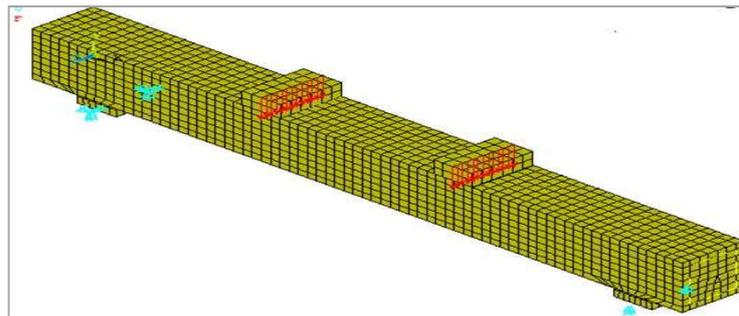


Fig. 9 - Discretization and meshing of the test beam by FE

software. The geometry, support conditions and loads of geometry, support conditions and loads are similar to those of the developed experimental work (Fig.7). The FE model of the beam is shown in Figures 8 and 9. Due to symmetry and for saving computational time, a quarter model of the tested beams was modeled and simulated [32]. Meshing and convergence analyses were performed by testing the different models. Table 3 shows all the mechanical characteristics of the laminated plates (CFRP) as well as the adhesive epoxy sikahard (reinforced with CNTs). For the other materials, the same characteristics were taken as those taken in the experimental part (Table 3).

In order to (To) simulate the behavior of the reinforced beams, the concrete geometry (Solid65 3D) is constructed by a volume element (block), which is defined using eight nodes located on its edges. The steel bars were modeled using (Link 180), which is a three-dimensional spar element with uni-axial tension and compression properties. Link180 was defined using two nodes

located on its edges and CFRP composites modified with CNTs, were modeled using the element (Shell 181). The nodes of the CFRP layer element (shell 181) and the discretized pieces of the steel element (link 180) are connected to the nodes of the adjacent concrete elements (solid 65) to provide the perfect bond (glue) between the two materials. For the single-bearing plates of the beam, the element chosen is Solid 185. These elements are connected with the concrete node by node [33] In order to establish the proper load distribution, and to ensure the best connectivity between the different discretized elements.

The discretization by finite elements gave a significant number of elements for the six tested beams. The Table4 below, gives us a summary of the overall number of model elements used. A total number of 2980 elements for the control beam (BC) and an identical number of 3076 for all other beams reinforced with CFRP/CNTs. The finite element modeling yielded significant values of bearing capacity, and concrete-deformation of each tested

Table 3

Beam notation (Ratio CNTs)	Modulus E		Poisson Ratio
	LaminataSika (GPa)	Epoxy Sikahard (GPa)	
BC	165	-	-
BL (0%)	165	12.5	0.25
BR1 (0.5%)	165	20	0.25
BR2 (1%)	165	25.5	0.25
BR3 (1.5%)	165	30	0.25
BR4 (2%)	165	38.5	0.25

Table 4

Model beam	Number of elements				
	Solid 65	Link 180	Shell 181	Solid 15	Total
BC	2448	404	/	128	2980
BL (0%)	2448	404	96	128	3076
BR1 (0.5%)	2448	404	96	128	3076
BR2 (1%)	2448	404	96	128	3076
BR3 (1.5%)	2448	404	96	128	3076
BR4 (2%)	2448	404	96	128	3076

Table 5

Beam notation (Ratio CNTs)	Ultimate load (kN)		Variation (%)	Strain (µm/m)		Variation (%)
	Exp.	FE		Exp.	FE	
BC	84	87.5	3.50	987.6	993.5	5.97
BL (0%)	90	95.3	5.90	1167.3	1175.2	6.78
BR1 (0.5%)	134.8	141.2	4.75	1186.7	1251.7	5.48
BR2 (1%)	157.6	165.3	4.90	1242.1	1314.2	5.77
BR3 (1.5%)	169.5	178.2	5.13	1342.5	1407.4	4.83
BR4 (2%)	184.5	192.1	4.12	1395.6	1451.8	4.03

beam. Table 5 presents a comparison of numerical and experimental values of the bearing capacity, deflection and concrete deformation of the different beams tested. These values show a good correlation between the finite element analysis and the experimental results, with a stiffness finding in favor of the finite element model. Several factors may be responsible for this high stiffness in the finite element models, among others, the connection between the concrete and the steel reinforcement, on the one hand, and the connection between the concrete and the composite (CFRP-matrix), on the other hand, are assumed to be perfect (no slip) in the finite element models.

To validate the finite element model, a comparative study with the published experimental results was carried out. The verification of the FE results goes through a gradual path by comparing the FE result and the experimental results through the values found for the load-deflection, as shown in Table 5. For the analysis of the ultimate load result (bearing capacity) which is, for the control beam BC, 84 kN compared to 87.5kN in favor of the FE model, i.e. a difference of 3.5%. Similarly, for beams strengthened with CFRP (modified with CNTs), the FE model gives a slight difference between 4.12% and 5.90%, which is acceptable [34]. For the

deformations, the maximum value appears for the beam rigidly reinforced with 2% CNTs (both experimentally and by the FE model). The difference between the two approaches varies between 4.03% and 6.78%. based on several recent investigations [35-36], the established model, with the non-significant deviations, remains acceptable.

Numerical FE analysis with adapted software records a crack pattern at each stage of the applied loading. Figures 10(a), 10(b) and 10(c), show the evolution of the cracks developing for each beam tested, up to the last loading stage [34]. It can be seen that circles appear at the cracking locations or crushing in the concrete elements. Cracking is represented by the outline of a circle in the plane of the crack. The first crack at an integration point is represented by a red circle, the second crack by a green circle and the third crack by a blue circle.

### 3. Diagnostic and Numerical analysis

#### 3.1. Study object

In order to monitor the behavior of a reinforced concrete beam bridge, located in a seismic region in Algeria, which requires repairs of some of its load-bearing elements, the carbon fiber composite material plating technique was applied.

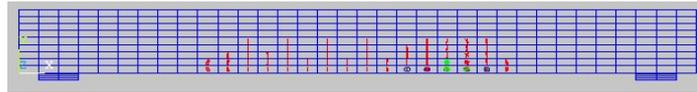


Fig. 10a. Cracks initiation for control beam by FE

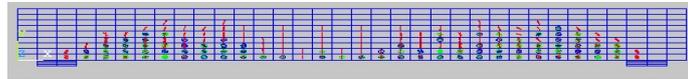


Fig. 10b. Crack propagation for tested beam by FE

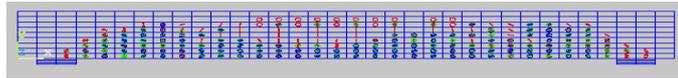


Fig. 10c. Cracking before beam failure



Fig.11 - View of the hyperstatic bridge on Oued Hachem.



Fig.12 - View from inside the degraded beams and support.

A preliminary modeling work using the finite element method (FEM), with appropriate software, was undertaken.

The aim of this study is to see the influence of nanotubes (CNTs) inserted in the epoxy resin of the composite materials, with the worst - case percentage of 2% (results of the experimental study). After a diagnosis was made, determining the causes of degradation, a modal analysis study of the structure in question was made for three cases: modeling of the unreinforced bridge in its actual state, modeling of the composite reinforced bridge (without nanotubes) and modeling of the composite reinforced bridge with the insertion of the resin/matrix of nanotubes (CNTs) at 2%.

### 3.2. Case study

It is a viaduct over the Oued elHachem located in the commune of Cherrhell in the city of Tipaza, 80 km west of Algiers, located in zone III characterized by high seismic activity [37]. The structure was built in 1978, is a hyper-static bridge with three spans, the deck consists of four reinforced concrete master beams, with variable inertia, connected by spacers and concrete beams topped by a reinforced concrete slab, while the substructure is composed of two intermediate piers and a central pier and two wind chests in the form of simple reinforced concrete supports (Fig.11). The geometrical characteristics of the bridge are:

- Total apron length: 69m;
- Number of beams: 4 beams spaced 1.8m;
- Thickness of the slab on beams: 25cm;

- Total width of the bridge: 10.40m with two sidewalks of 1.7m each;
- Infrastructures: Sail stacks - 2 sums;
- Hyperstatic bridge at 2 spans (24m) and twoconsols (10.5m);
- Foundations: surface type;
- Bedrock: 9m×1m×4m;
- Support height: 4.5m.

### 3.3. Dignostic of degradations

Degradations are visible on the structural elements of the bridge (beams, supports and sails), with cracking in the concrete cover and corrosion of the reinforcement in the beams and supports. The corrosion of the piles affected the concrete lid with minimal loss of steel and concrete section probably due to the aggressive marine environment (Fig. 12). The diagnosis also reveals concrete bursts at the levels of some main elements indicating an increase in bending stresses mainly due to the increase in road traffic. This damage was probably exacerbated by the earthquake that struck the region in 1989 at a magnitude of 6.1 on the Richter scale. The analysis of the degradation and their causes enabled the proposition of rehabilitation and strengthening solution of the deteriorated elements to restore their initial load capacity and gives to the structure its initial performance [1]. The procedure used to strengthen the bridge elements was as follows:

- Repair of all degraded parts with appropriate mortars;

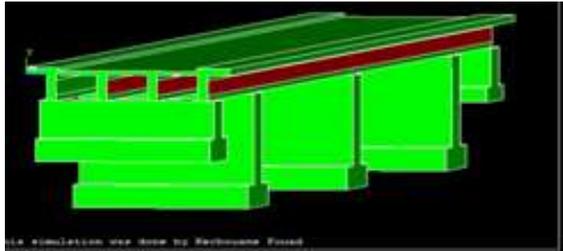


Fig.13 - Application of sikawrap sheet

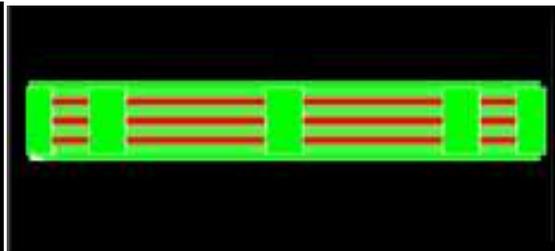


Fig. 14 - The laminate plates on the bottom side beam

Table 6

Mechanical characteristics of the materials used

Used materials	Modulus E (MPa)	Density	Tensile strength (MPa)	Compressive (MPa)	Extension at failure (%)	Thickness (mm)
Concrete	35	2.5	3.0	33.5	-	-
High strength steel	210	7.8	550	550	-	12
Mild steel	210	7.8	400	400	-	6
Epoxy sika hard 30	12.8	1.8	30	55	-	-
Sika wrap sheet	230 000	-	3500	-	1.5	0.13
Laminate sika	165 000	-	2800	-	1.7	1.2

Table 7

Values of the concrete for classic technical of repair

Values of the materials	Elasticity Modulus (MPa)	Poisson coefficient	Tickness (mm)
Before reinforcement	23 000	0.2	varied
After reinforcement	35 000	0.2	added of 10cm

- Injection of cracks by epoxy resin improved by nanotubes (2%);
- Reinforcement of the beams by application of laminated plates (CFRP);
- Application, by confinement, of vertical facings (beams and supports).

In order to restore the initial rigidity of the deteriorated elements and strengthen them in order to be able to withstand new road traffic overloads and extreme weather conditions, the choice of appropriate repair materials is important. Repair techniques are: flexural and shear reinforcement by carbon fiber composite materials for beams and supports. Unidirectional Sika wrap sheets (80 mm in width and 0.13 mm in thickness) were applied to the side faces of the main beams to increase their shear resistance while the carbon fiber laminate Sika carbohard (80 mm in width and 1.2 mm in thickness) were applied to the lower faces of these same beams to increase their flexural strength (Figs 13 and 14). To see the influence of carbon nanotubes (CNTs), inserted in each epoxy resin, used (for the unidirectional Sika wrap or sika Carbodur), on the dynamic behavior of the structure, we took, for the modeling, the most critical results found in the experimental part, namely without reinforcement (0% of CNTs) and 2% of nanotubes (CNTs) insertion in the epoxy. For this, the modeling will focus on three cases:

- Modeling of the bridge in the real state (unreinforced);
- Modeling of the bridge with reinforcement by CFRP without nanotubes (CNTs);

- Modeling of the bridge with CFRP reinforcement, with 2% nanotubes (CNTs).

The characteristics of the repair and strengthening materials used are summarized in Table 6. The repair and strengthening of the bridge structure took 8 months. Data for the testing and modeling was collected on-site from the provincial public works department and other experts or stakeholders.

In the case of the repair by application of the concrete shell, for the other elements of the bridge (supports such as piers and abutments), the added thicknesses gave a slight change and the Young's modulus (E), which will be increased from 15% to 25% [38], compared to the Young's modulus of the existing concrete, due to the improved composition of the added material (concrete). This is a 400Kg/m<sup>3</sup> concrete, composed of washed sand and corrective sand, as well as 3/8 and 8/15 gravel, added with drinking water. This concrete was sprayed on the degraded areas after the preparation of the supports. Table 7 below illustrates the values introduced in the modeling of the selected case study.

### 3.4. Numerical modeling by finite elements

#### 3.4.1. Analysis data

The application of the finite elements method through with appropriate software allowed the data to be introduced to calculate the mass and cross-sectional rigidity, before and after the repair and reinforcement of the structure of this bridge. If the global mass is not influenced by the insertion of

composites (given their lightness), the transverse rigidity (K) on the other hand increases considerably by the increase in the value of the Young module (E).

**3.4.2. Numerical analysis**

The three-dimensional modeling was carried out by finite elements (EF) and with the software chosen for this purpose. The ground-to-structure interaction has been neglected. The non-linear behavior of concrete and steel, as well as those of applied composites and resins, was taken into account. The finite elements types used in the modeling of the reinforced concrete elements (beams and slabs) with steel fibers are listed in Table 7 [39].

Composite materials were introduced in the calculation of Young's modulus and transverse stiffness of the structure. Concrete reinforced with carbon fiber sheets is considered to retain its actual nonlinear behavior. The deterioration is taken into account, in the finite element modeling, by the choice of the value of the longitudinal elasticity modulus (Young's modulus) E. The E-value of the damaged concrete (before the bridge repair) is significantly lower than that of the concrete after its repair. The beams are simply supported and the supports are anchored in the foundations (Fig.15).

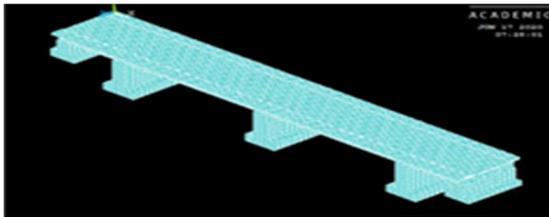


Fig.15. - Modeling of the bridge structure

The modeling was performed by modal analysis of the structure, where the objective is to determine the frequencies and fundamental modes, before and after the reinforcement of the structure to see the influence of the composites and the effect of nanotubes (CNTs) inserted in the resin. The number of modes taken into account is six (6), so that the whole selected modal masses represents the total mass of the structure (about 90%) in our case.

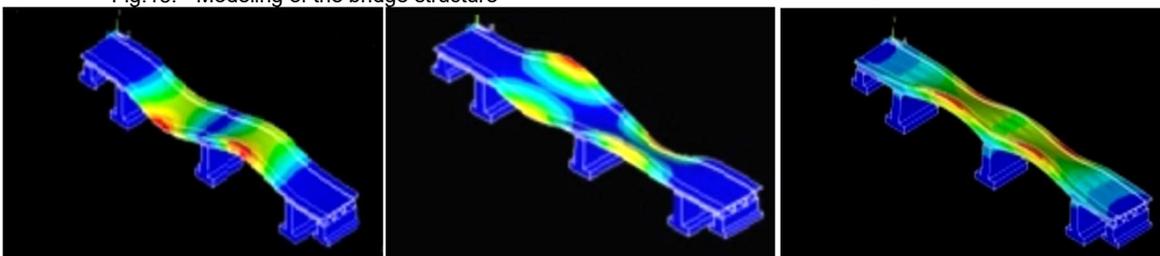
**4. Results and discussion**

**4.1. Numerical modeling**

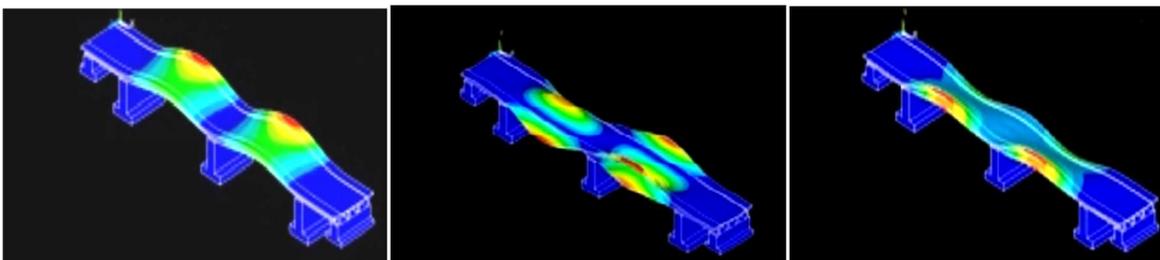
The three-dimensional finite element model that was chosen for the determination of the fundamental frequencies and modes of vibration was able to provide insight into the influence of bonded composites on the overall behavior of the bridge structure. This was not easy, since in order to develop this complex finite element model, several approximations were adopted, taking into account the material properties, the stiffness of the bridge load-bearing elements, the influence of the composite materials, as well as the insertion of nanotubes CNTs in the resin of these materials, adding the bonding mode on the girders and the model of the bridge supports. The finite element model chosen allowed the adjustment of the selected parameters until reasonable values were obtained for the natural frequencies and modal shapes [40].

**4.2 Numerical results of the selected model**

The modal analysis of the structure taken as a case study led to its modal parameters [41]. The modal frequencies obtained by FEM analysis are given in Table 8, with the corresponding modes illustrated in Figure 16.



Mode1. Longitudinal Translation (N)      Mode2. First vertical bending (Z)      Mode3. Simple torsion



Mode 4. Second vertical bending (Z)      Mode5. Double torsion of surface bridge      Mode6. Lateral Translation (E)

Fig.16 - The different modes obtained for modal analysis testing bridge.

Table 8

Finite elements types	
Composing element	Number of nodes
Concrete	8-node brick
Steel	2-node discrete
Composite	8-node brick

Table 9

Frequency values obtained by MEF analysis				
N°	Frequency before repair/ CFRP (Hz)	Frequency after repair/ CFRP (Hz)	Frequency after repair with CFRP/CNTs (Hz)	Mode of excitation
1	3.02	3.82	4.93	Horizontal (N)
2	3.28	4.27	6.51	Vertical (Z)
3	4.09	5.08	7.11	Torsion
4	6.53	7.42	9.07	Vertical (Z)
5	8.82	10.12	12.13	Double Torsion
6	12.34	14.07	16.22	Horizontal (E)

The first six dominant modes were distinguished for the three comparisons (before application of reinforcement and after reinforcement by CFRP composites (with and without application of CNTs nanotubes). The dominant mode is the longitudinal translation mode (N) with clear increases (from 3.02 to 3.82 Hz) and (from 3.02 to 5.02 Hz), respectively for the reinforcement with only CFRP composites and for the reinforcement with improved bonding resin performance (Table 9). These are 26.5% and 63.25% gains. It was found that the insertion of nanotubes increased the frequency by almost 34%, with only 2% of use of CNTs by weight. For the other modes, the CFRP composite was found to improve the frequency by about 31% at most, compared to almost 98.5% for the CFRP with resin mixed with CNTs. The improvement in the quality and performance of the adhesive of the composite is very beneficial for the repair of concrete structures due to the appreciable increase in transverse stiffness  $K_y$ . For the shapes of the vibration modes, the same observation (type of mode) is generalized and this is understandable given the transverse stiffness  $K_y$  much higher than the longitudinal stiffness  $K_x$  of the tested structure [42].

### 4.3 Comparison and comments

By correlating the experimental results obtained from the laboratory bending test (on a reduced scale) on beams reinforced by insertion of nanotubes (CNTs) and the numerical model of the reinforced structure (full scale), we clearly see the gain brought by the increase in the performance of the resin glue (adhesive). In fact, the parameters that influence the static behavior of the beams (breaking force) or the dynamic behavior of the bridge (natural frequencies of vibration), are the Young's modulus of the composite element (concrete - CFRP) and the more adequate adhesion in the interface (glue - fibers).

## 5. Conclusions

The present paper studied the behavior of reinforced concrete structural elements

strengthened by the application of composite materials with CNTs nanotubes insertion. The work consisted, on the one hand, of an experimental investigation where twelve reinforced concrete beams were fabricated, strengthened by CFRPs (without or with CNTs nanotubes), and then tested under four-point bending loads. In the second part, a modal analysis using the finite element method was undertaken on an old concrete bridge structure, whose load-bearing elements were reinforced with CFRP composites reinforced with 2% CNTs nanotubes. The following conclusions can be drawn:

- The incorporation of nanotubes (CNTs) in the adhesive of the composite increased the strength of the tested beams, with dosages varying from 0.05% to 2% of these nanotubes. The latter gave gains ranging from 68% to 116% (BR1, BR2, BR3 and BR4 beams), against 57% without CNTs (BL beam), an average increase of 40%.
- The finite element model chosen to calibrate the experimental results of the reinforced beams, gave values very close to the experimental reality, with values ranging from 3.5% to 7% (for failure load or deformation), which suggests that the model was adequate. The numerical modeling by application of the Finite Element Method (FEM), widely used universally, allowed us to choose a numerical model close to reality and allowing a thorough reading of the results.
- It is possible to apply the technique of bonded composite reinforcement, improved by the insertion of nano-composite powders CNTs (at the level of the resin) on the support of a concrete beam deck, to avoid the delamination (debonding) of the composite, especially in aggressive climates.
- The value of the modulus of elasticity  $E$  indicates the actual condition of the material and possible damage to the deck. The transverse stiffness  $K_y$ , before and after strengthening, reflects the changes in the structure.
- The predominant mode of the bridge is vertical bending, in the horizontal direction, with a frequency of 3.02 Hz before the CRFP reinforcement and 3.82 Hz and 4.93 Hz respectively after (without and with CNT).

- The obtained results, both experimental and numerical, allow recommending an adequate choice of the repair and/or strengthening technique for all old or deteriorated structures of the existing reinforced concrete heritage.

#### Acknowledgments:

The authors would like to thank all those who have contributed, directly or indirectly, to the realization of this work in particular the local authorities of the city of Tipaza, as well as the provincial authorities of public works. Our sincere thanks to Pr Kenai S., of the University of Blida1 and Pr Bali A. and Dr Laichaoui A. of the National Polytechnic School of Algiers for their valuable assistance in the experimental part.

#### REFERENCES

- M. Abdessemed, S. Kenai, A. Bali and A. Kibboua, Dynamic analysis of a bridge repaired by CFRP: Experimental and numerical modeling. *Construction and Building Materials* 2011, **25**, 1270–1276.
- A. Dihaj, Numerical modeling of the mechanical behavior of a nano-composite to polymer matrix and nano-renfort. PhD Thesis in Science (in French). Djillali Liabes, University Sidi Bel Abbes 2009, Algeria, URL: <http://hdl.handle.net/123456789/2503>.
- F.H. Gojny, M.H.G. Wichmann, B. Fiedler, Influence of different carbon nanotubes on the mechanical properties of epoxy matrix composites a comparative study. *Journal of Composites Sciences and Technology*, 2005, **65**, (15-16), pp: 300-2313
- A. Godara, L. Mezzo, F.Luizi, A. Warriar, A and S.V.Lomov, Influence of carbon nanotube reinforcement on the processing and the mechanical behavior of carbon fiber-epoxy composites. *Journal Carbon*, 2009, **47**(12), 2914-2923.
- Q.Yang, L. Zhang, Y. Qian, J. Zhong, Performance evaluation of bitumen with a homogeneous dispersion of carbon nanotubes. *Journal Carbon*, 2020, **158**, 465-471.
- P. Coronado, A. Argüelles, V. Viña, J. Viña, Influence of low temperatures on the phenomenon of delamination of mode I fracture in carbon-fibre/epoxy composites under fatigue loading. *J. Composite Structures*, 2014, **112**, 188-193.
- P. Coronado, A. Argüelles, J. Viña, V. Mollón, and I. Viña, Influence of temperature on a carbon-fibre epoxy composite subjected to static and fatigue loading under mode-I delamination, *International Journal of Solids and Structures*, 2012, **49**, 2934–2940.
- G. Metelli, M. Preti, E. Giuriani, On the delamination phenomenon in the repair of timber beams with steel plates. *Construction and Building Materials*, 2016, **102**, 1018–1028.
- R.N. Swamy, R. Jones, J.W. Bloxham, Structural behaviour of reinforced concrete beams strengthened by epoxy-bonded steel plates, *Journal of Structure Engineering*, 1987, **65A** (2), 59–68.
- D.J. Oehlers, J.P. Moran, Premature failure of externally plated reinforced concrete beams, *Journal of Structure Engineering*, 1990, **116** (4), 978–995.
- H.Rahimi, A. Hutchinson, Concrete beams with externally bonded FRP plates, *Journal of composites for construction/ASCE*, 2001, **5**(1), Feb. 2001, 44–56.
- W.M. Sebastian, Significance of midspan debonding failure in FRP-plated concrete beams, *ASCE/ Journal of Structural Engineering*, 2001, **127**(7), 792–798.
- T.Schumacher, E.T.Thostenson, Development of structural carbon nanotube-based sensing composites for concrete structures. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2014, **25** (11), 1331–1339.
- L.Raki, J.Beaudoin, R. Alizadeh, J. Makar, T. Sato, Cement and concrete nanoscience and nanotechnology, *J.Materials (basel)*, 2010, **3** (2), 918–942.
- P. Dharap, Z. Li, S. Nagarajaiah and E.V Barrera, Flexural strain sensing using carbon nanotube film. *Sensor Review*. 2004, **24**(3), 3, 271–273.
- I. Kang, M.J. Schulz, J.H Kim, V. Shanov and D. Shi. A carbon nanotube strain sensor for structural health monitoring. *Smart Materials and Structures*, 2006, **15**(3), 737–748.
- C.QYang, Z.S.Wu, Self-structural health monitoring function of RC structures with HCFRP sensors. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2006, **17**(10), 895–906.
- M.R. Irshidat, M.H. Al-Saleh, Flexural strength recovery of heat-damaged RC beams using carbone nanotubes modified CFRP, *Construction & Building Materials*, 2017, **145**, 474-482.
- M.R. Irshidat, M.H. Al-Saleh, M.H. and H. Almashagbeh, Effect of carbon nanotubes on strengthening of RC beams retrofitted with carbon fiber/epoxy composites. *Materials & Design*, 2016, **89**:225–234. doi: [10.1016/j.matdes.2015.09.166](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.166).
- M.R. Irshidat, M.H. Al-Saleh.; M. Al-Shoubaki, Using carbon nanotubes to improve strengthening efficiency of carbon fiber/epoxy composites confined RC columns. *Compos. Struct.* 2015, **134**, 523-532, doi: [10.1016/j.compstruct.2015.08.108](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.08.108).
- M.A Qissab, S.T. Abbas, Behaviour of reinforced concrete beams with multiwall carbon nanotubes under monotonic loading, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016, <http://doi.org/10.1080/19648189.2016.1232661>.
- M. Baccocchi, A.M. Tarantino, Modeling and numerical investigation of the viscoelastic behavior of laminated concrete beams strengthened by CFRP strips and carbon nanotubes, *Construction and Building Materials*, 2020, **233**. 117311 [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117311](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117311).
- T.C Rousakis; K.B. Kouravelou, T.K. Karachalios, T.C. Rousakis, Effects of carbon nanotube enrichment of epoxy resins on hybrid FRP-FR confinement of concrete. *Composites Part B Eng.*, 2014, **57**, 210–218.
- M.R.Irshidat, Improved bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete with carbon nanotubes. *Construction & Building Materials* 2020, **257** : 119562, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2020.119562](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119562)
- T.Liu, L.Y.Phang, L. Shen, S.Y.Chow, W.D. Zhang, Morphology and Mechanical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6 Composites, 2004, *Macromolecules*, ACS Publications, 37, 7214-7222.
- A.M. Anwar, M.S.Khalafalla, and E.K. Mohamed, Effect of nanocomposites on the dynamic properties of repaired flexural elements. *Water Science*, 2018, **32**, 276–286. [doi.org/10.1016/j.wsj.2018.07.003](https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.07.003).
- M.Hussein, H.M.E.D H. Afefy, A.A.Khalil, Innovative Repair Technique for RC Beams predamaged in Shear. *Journal of Composites and Construction*, 2013, **17**(6), doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000404.
- A.H. Korayem, Y.M.Liu, X.L. Zhao, W.H. Duan, Bond characterization of steel-CFRP with carbon nanotube modified epoxy adhesive via pull-off tests, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2015, **15** (8), <https://doi.org/10.1142/S0219455415400271>.
- S. Xiaobin, C. Qi, L. Yeqi, L. Chenz, Bond behavior between steel bars and carbon nanotube modified concrete. *Construction and Building Materials*, 2020, **255**, 119339. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119339](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119339).
- Z.Y. Wu, Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton armé pré-fissurées et renforcées par matériaux composites sous chargement statique et de fatigue, Thèse de doctorat 2004, ENPC, Paris, France., HAL Id: pastel-00001266 <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00001266> Submitted on 10 Sep 2010.
- G. Skripkiunas, G. Yakovlev, E. Karpova, Hydration process and physical properties of cement systems modified by calcium chloride and multi-walled carbon nanotubes, *Romanian Journal of Materials*, 2019, **49** (1), 58 -67.

32. M.R. Irchidat, R.S. Al Husban, Effect of bond enhancement using carbon nanotubes on flexural behavior of RC beams strengthened with externally bonded CFRP sheets, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2022, <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0787-8>.
33. A.M. Ibrahim, M.Sh. Mahmood, Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Laminates, *European Journal of Scientific Research*, 2009, ISSN 1450-216X, **30**(4), 526-541.
34. R.Salih, Z.Fangyuan, Numerical Investigation of the Behavior of Reinforced Concrete Beam Reinforced with FRP Bars, *Civil Engineering Journal*, 2019, **5**(11), November.
35. W.S. Barham, M.R.Irshidat, A.Awawdeh, Repair of Heat-Damaged RC Beams Using Micro-concrete Modified with Carbon Nanotubes, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, **25**(7), 2534-2543 DOI 10.1007/s12205-021-0904-1.
36. R.A. Hawileha, J.A. Abdallaa, M.Z. Naserb, Modeling the Shear Strength of Concrete Beams Reinforced with CFRP Bars under Unsymmetrical Loading, 2019, *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 1-8. (<https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1432803>).
37. Algerian seismic regulation code for bridge structures, (RPOA), 2008, Regulatory Technical Document, Ministry of Public Works, Algiers, Algeria.
38. M. Abdessemed, S.Kenai, Dynamic study of a concrete water tower reinforced by CFRP composites (In French), *Academic Journal of Civil Engineering*, 2020, **38**(2), Special Issue Diagonobéton 2020.
39. L. Tianxi, P. In Yee, S.Lu, Y.C. Shue, Z.Wei-De, Morphology and Mechanical Properties of Multiwalled Carbon Nanotubes Reinforced Nylon-6 Composites. *Macromolecules*, 2004, **37**, 7214-7222. [doi.org/10.1021/ma049132t](https://doi.org/10.1021/ma049132t).
40. A.A. Hafedh, G.H. Hassan, M.W. Falah, Nonlinear Shear Behavior of Reinforced Concrete Beams with Steel Fibers Using ANSYS. *Solid State Technology*, 2020, ISSN: 0038-111X 63(1).
41. R.Y. Wu, Ch.P. Pantelides, Seismic evaluation of repaired multi-column bridge bent using static and dynamic analysis. *Construction & building material*, 2019, **228**, 792-807. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.027](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.027).
42. K.O. Cival S.D.Akbaş, B. Akgöz, S. Dastjerdi, Forced Vibration Analysis of Composite Beams Reinforced by Carbon Nanotubes. *Nanomaterials*, 2021, **11**(3), 571. [doi.org/10.3390/nano11030571](https://doi.org/10.3390/nano11030571).

\*\*\*\*\*

**SEMINAIRES ET  
CONFERENCES  
INTERNATIONALES**

**Séminaire International sur l'Ingénierie de la Construction des Villes  
(Architecture, Génie Civil, Hydraulique, Travaux publics et Urbanisme)**

*Le 08 et 09 Octobre 2021, Oran*

**Intitulé de la communication** : Renforcement des Dallettes en Béton par des Nanotubes CNTs.

**Auteurs** : Ouadah N. , Abdessemed M. , Saidj K.

**Journée Scientifique En Génie Civil  
(JSGC'22)**

*Le 01 Décembre 2022, Blida*

**Intitulé du Poster** : Static Behavior of Concrete Structures Reinforced with Nanotubes Modified Composites.

**Auteurs** : Ouadah N. , Abdessemed M.

**First International Conference on Materials Science and Applications  
(ICMSA'23)**

*Le 08 et 09 Février 2023, Khenchla*

**Intitulé de la communication** : Influence of Carbon Nanotubes CNTs on the bending behavior of Concrete Pavement – Experimental Approach.

**Auteurs** : Ouadah N. , Abdessemed M.

**6th Annual International Conference on Eco-Sustainable Construction  
Materials  
(ICESCM 2023)**

*Le 20 et 21 Avril 2023, Paris*

**Intitulé de la communication** : Application of Nanotubes CNTs for Strengthening Concrete Bridge Deck Elements.

**Auteurs** : Ouadah N. , Abdessemed M.