

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJDE BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de fin d'études**

Présenté par :

**DEMMOUCHE Fahima  
TALEB Karima**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2** en :

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Structures**

**Thème :**

**FLAMBEMENT DES ELEMENTS EN BETON RENFORCÉS PAR DES  
COMPOSITES**

**Devant le jury composé de :**

Mme. BOUMAIZA.	MAA	UAMOB	PRESIDENTE
Mr. AIT TAHAR. K	PROFESSEUR	UAMOB	PROMOTEUR
Mr. BOUAMRA. Y	MCB	UAMOB	CO- PROMOTEUR
Mr. MOUSSAOUI. F	MCB	UAMOB	EXAMINATEUR

**Année Universitaire 2019/2020**

## REMERCIEMENTS

*Tout d'abord, nous tenons à remercier le « bon dieu » de nous avoir accordé la force et le courage pour accomplir ce modeste travail.*

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance la plus sincère à notre promoteur, le professeur AIT TAHAR Kamal, de nous avoir proposé le thème de ce mémoire et nous avoir orienté et soutenu tout au long des étapes de réalisation de notre étude. C'est grâce à lui que ce travail a été réalisé dans les meilleures conditions. Sans son aide, nos efforts seront vains.*

*Nos remerciements vont également à notre co-promoteur Mr. BOUAMRA Youcef pour son aide qui nous a apportée lors de la simulation numérique.*

*Nos vifs remerciements iront aussi aux membres de jury qui nous feront l'honneur d'évaluer notre travail.*

*Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de notre mémoire.*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A ceux qui m'ont tout donné sans attendre rien en retour.*

*A ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans les moments les plus difficiles.*

*A ceux qui m'ont apporté leur appui et qui m'ont donné la tendresse, la confiance, le courage et la sécurité...A mes parents !*

*Aucun mot ne serait exprimé mon amour, Vous êtes la lumière de mes yeux, l'ombre de mes pas et le bonheur de ma vie.*

*Je dédie aussi mon travail :*

*A tous les membres de ma famille.*

*A mes amis.*

*A mon binôme Karima.*

*Fahima*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon père disparu trop tôt !*

*À ma mère qui m'a soutenu tout au long de mes études, que Dieu la protège. Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis ma naissance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*À mon frère Oulaid et mes oncles Makhlouf et Arezki qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotion lors de la réalisation de ce travail, ils m'ont encouragé et supporté tout au long de mon parcours.*

*À Mon AMI : Tahar en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passé ensemble.*

*À mon binôme Fahima.*

*Veillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

*Karima*

## RÉSUMÉ

Le phénomène d'instabilité des éléments en béton soumis à des charges de compression est nommément appelé 'flambement'. Ce phénomène est surtout observé et rencontré sur des éléments élancés soumis à un effort de compression excentré, qui provoque un déplacement transversal plus important, même sous de faibles charges. D'un point de vue mécanique, les poteaux élancés présentent un comportement non linéaire.

Le confinement externe des poteaux par les composites 'FRP' peut être considéré comme une alternative aux techniques anciennes de renforcement, en raison de leurs caractéristiques mécaniques élevées, car la pression latérale exercée par le composite sur le béton augmente linéairement en raison du comportement élastique linéaire de ce matériau, cependant, le confinement total du poteau est onéreux car il consomme une grande quantité de matériaux composites. Le contexte de l'étude réalisée dans ce travail de recherche, à travers la réalisation des simulations numériques à base des éléments finis, du comportement des poteaux élancés sous une charge de compression, est particulièrement lié au problème de renforcement partiel des poteaux en béton armé par les composites et l'influence sur les résistances ultimes, la ductilité et le mode de flambement des poteaux en béton armé.

Cinq (05) variantes de renforcements partiels des poteaux élancés ont été proposées et simulées sous une charge axiale de compression jusqu'à la rupture. Le comportement mécanique est illustré par les courbes forces- déplacements. Les résultats montrent que le renforcement partiel des poteaux élancés influe sur la résistance ultime selon la zone renforcée du poteau mais ne modifie pas le mode de flambement. La confrontation des résultats de toutes les variantes montre que le renforcement partiel de la partie centrale diminue la résistance au flambement contrairement au cas du renforcement des parties extrêmes proches des extrémités où la résistance au flambement est améliorée.

**Mots clés :** Poteau élancé, béton armé, composite, renforcement partiel, modélisation.

## ABSTRACT

The phenomenon of instability of concrete elements subjected to compressive loads is called by name buckling. This phenomenon is especially observed and encountered on slender elements subjected to an eccentric compressive force, which causes a greater transverse displacement and this even under low loads. From a mechanical point of view, slender columns exhibit non-linear behavior.

The external confinement of columns by a composite FRP lining can be considered as an alternative to old techniques of reinforcement, due to their high mechanical characteristics, because the lateral pressure exerted by the composite on the concrete increases linearly due to the linear elastic behavior of this material, however, total confinement of the post is expensive and consumes a large amount of composite material. The context of the study carried out in this research work, through the realization of numerical simulations based on finite elements, of the behavior of slender columns under a compressive load, is particularly linked to the problem of partial reinforcement of reinforced concrete columns. by composites and the influence on ultimate strengths, ductility and buckling mode of reinforced concrete columns.

Five (05) variants of partial reinforcement of slender columns have been proposed and simulated under an axial compressive load until failure. The mechanical behavior is illustrated by the force-displacement curves. The results show that the partial reinforcement of slender columns influences the ultimate resistance according to the reinforced zone of the column but does not modify the buckling mode. The comparison of the results of all the variants shows that the partial reinforcement of the central part decreases the buckling resistance unlike the case of the reinforcement of the end parts close to the ends where the buckling resistance is improved.

**Keywords:** Slender column, reinforced concrete, composite, partial reinforcement, modeling.

## ملخص

تسمى ظاهرة عدم استقرار العناصر الخرسانية المعرضة لأحمال ضاغطة بالتواء الاسم. يتم ملاحظة هذه الظاهرة بشكل خاص ومواجهتها على العناصر النحيلة التي تتعرض لقوة ضغط غريبة الأطوار ، والتي تسبب إزاحة عرضية أكبر وهذا حتى في ظل الأحمال المنخفضة. من وجهة نظر ميكانيكية ، تظهر الأعمدة النحيلة سلوكًا غير خطي.

يمكن اعتبار الاحتواء الخارجي للأعمدة بواسطة بطانة FRP بديلاً لتقنيات التعزيز القديمة ، نظرًا للخصائص الميكانيكية العالية للمركبات ، لأن الضغط الجانبي الذي يمارسه المركب على الخرسانة يزداد خطيًا بسبب السلوك الخطي المرن لهذا. ومع ذلك ، فإن الاحتواء الكلي للمنشور يعد مكلفًا ويستهلك كمية كبيرة من المواد المركبة. سياق الدراسة التي أجريت في هذا العمل البحثي ، من خلال تحقيق المحاكاة العددية القائمة على عناصر محدودة ، لسلوك الأعمدة النحيلة تحت الحمل الانضغاطي ، يرتبط بشكل خاص بمشكلة التعزيز الجزئي للأعمدة الخرسانية المسلحة. عن طريق المواد المركبة والتأثير على القوة المطلقة والليونة ووضع الانحناء للأعمدة الخرسانية المسلحة.

تم اقتراح خمسة (05) أنواع مختلفة من التعزيز الجزئي للأعمدة النحيلة ومحاكاتها تحت حمل ضغط محوري حتى الفشل. يتضح السلوك الميكانيكي من خلال منحنيات إزاحة القوة. أظهرت النتائج أن التعزيز الجزئي للأعمدة النحيلة يؤثر على المقاومة النهائية وفقًا للمنطقة المقواة بالعمود ولكنه لا يعدل وضع الانثناء. تُظهر مقارنة نتائج جميع المتغيرات أن التعزيز الجزئي للجزء المركزي يقلل من مقاومة الالتواء على عكس حالة تقوية الأجزاء الطرفية القريبة من النهايات حيث تم تحسين مقاومة الانثناء.

**الكلمات الرئيسية:** عمود رفيع، خرسانة مسلحة ، مركب ، تسليح جزئي ، نمذجة.

# *Tables des matières*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FLAMBEMENT.....</b>	<b>4</b>
I.1 Introduction.....	4
I.2 Poteau court .....	4
I.2.1 Définition.....	4
I.2.2 Phénomène d'instabilité .....	4
I.3 Longueur de flambement .....	6
I.4 Flambement des poteaux selon les conditions de liaisons aux appuis.....	6
I.4.1 Poteau articulé à ses extrémités .....	6
I.4.2 Charge critique d'Euler .....	7
I.4.3 Flèche et courbure à mi- hauteur du poteau .....	8
I.4.4 Elancement .....	9
I.4.5 Modes de rupture .....	9
I.5 Poteau d'élancement intermédiaire.....	10
I.6 Poteau élancé .....	10
I.7 Rapport $M_1/M_2$ .....	11
I.8 Poteau renforcé par composites .....	11
I.9 Comportement du béton confiné par composite PRF .....	12
I.9.1 Confinement passif et déformation latérale .....	12
I.9.2 Réponse contrainte-déformation d'un béton confiné par composite PRF en compression axiale : .....	13
I.10 Conclusion du chapitre .....	15
<b>CHAPITRE II : EFFETS DES PARAMETRES D'ETUDE : ANALYSE PARAMETRIQUE.....</b>	<b>16</b>
II.1 Introduction .....	16
II.2 Résultats et analyses .....	16
II.3 Conclusion du chapitre .....	21
<b>CHAPITRE III. RENFORCEMENT PARTIEL .....</b>	<b>22</b>
III.1 Introduction .....	22

III.2	Présentation du logiciel .....	22
III.3	Fonctionnement du code ABAQUS .....	23
III.3.1	Les éléments .....	24
III.3.2	Types de non linéarité .....	25
III.4	Présentation de l'interface ABAQUS /CAE .....	25
III.5	Présentation des modèles à simuler.....	28
III.5.1	Poteau avec un ferrailage classique, de référence : (P-Réf).....	29
III.5.2	Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de un (01) m de longueur : PRC-1 .....	30
III.5.3	Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de 1,5 m de longueur : PRC-3/2 .....	31
III.5.4	Poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP : PRC-3.....	32
III.5.5	Poteau avec un ferrailage classique renforcé avec deux (02) bandes composites GFRP de 0,5 m de longueur respectivement, disposées aux extrémités du poteau. PRC-2B1/2.....	33
III.6	Caractéristiques mécaniques .....	34
III.7	Conclusion du chapitre.....	35
<b>CHAPITRE IV : PRESENTATION DES RESULTATS ET ANALYSES .....</b>		<b>36</b>
IV.1	Introduction.....	36
IV.2	Présentation des résultats et analyses.....	36
IV.2.1	Poteau avec un ferrailage classique (P-Réf) : .....	36
IV.2.2	Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de un (01) m de longueur : PRC-1 .....	37
IV.2.3	Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de 1,5 m de longueur : PRC-3/2 .....	39
IV.2.4	Poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP : PRC-3.....	40
IV.2.5	Poteau avec un ferrailage classique renforcé avec deux (02) bandes composites GFRP de 0,5 m de longueur respectivement, disposées aux extrémités du poteau. PRC-2B1/2.....	42
IV.3	Conclusion du chapitre.....	44
<b>Conclusion générale .....</b>		<b>45</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>		<b>47</b>

# Listes des figures

<b>FIGURE I-1.</b> PHENOMENE D'INSTABILITE DE FORME .....	5
<b>FIGURE I-2.</b> SCHEMA DE RUPTURE DES POTEAUX COURTS .....	5
<b>FIGURE I-3.</b> RUPTURE DANS UN POTEAU .....	6
<b>FIGURE I-4.</b> COURBE DE FLAMBEMENT D'EULER ET COURBE REELLE .....	7
<b>FIGURE I-5.</b> POTEAU DROIT BI- ARTICULE EN COMPRESSION .....	8
<b>FIGURE I-6.</b> EFFET DE L'ELANCEMENT SUR LE MODE DE RUPTURE .....	9
<b>FIGURE I-7.</b> POTEAU ELANCE SOUS CHARGE EXCENTREE .....	10
<b>FIGURE I.8 .</b> RAPPORT M1/M2.....	11
<b>FIGURE I-9.</b> TECHNIQUES DE CHEMISAGE EN BETON .....	12
<b>FIGURE I-10.</b> EFFET DE CONFINEMENT EXERCE PAR LE COMPOSITE PRF SUR LE NOYAU DE BETON.....	13
<b>FIGURE I-11.</b> CLASSIFICATION DES COURBES CONTRAINTE-DEFORMATION.....	14
<b>FIGURE II.1.</b> VARIATION DE L'ELANCEMENT ' $\lambda$ ' EN FONCTION DU RAYON DE GIRATION ' $i$ ' SELON DIFFERENTES VALEURS DE LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT ' $l_f$ ' .....	16
<b>FIGURE II.2.</b> VARIATION DE L'ELANCEMENT ' $\lambda$ ' EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT ' $l_f$ ' POUR LE CAS DES SECTIONS CARREES.....	17
<b>FIGURE II.3.</b> VARIATION DE L'ELANCEMENT ' $\lambda$ ' EN FONCTION DE LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT ' $l_f$ ' POUR LE CAS DES SECTIONS RECTANGULAIRES. ....	18
<b>FIGURE II.4.</b> CONTRAINTE CRITIQUE EN FONCTION DE L'ELANCEMENT ' $\lambda$ ' POUR DIFFERENTES VALEURS DE LA LONGUEUR DE FLAMBEMENT ' $l_f$ '.....	20
<b>FIGURE III.1.</b> LES ETAPES ESSENTIELLES DE FONCTIONNEMENT .....	23
<b>FIGURE III.2.</b> FONCTIONNEMENT DU CODE ABAQUS .....	24
<b>FIGURE III.3.</b> QUELQUES ELEMENTS MODELISES SUR ABAQUS .....	24
<b>FIGURE III.4.</b> LE MODULE « PART » .....	26
<b>FIGURE III.5.</b> LE MODULE « PROPERTY » .....	266
<b>FIGURE III.6.</b> LE MODULE « ASSEMBLY » .....	27
<b>FIGURE III.7.</b> POTEAU AVEC UN FERRAILLAGE CLASSIQUE, DE REFERENCE : (P-REF).....	29
<b>FIGURE III.8.</b> POTEAU AVEC UN FERRAILLAGE CLASSIQUE RENFORCE DANS SA PARTIE CENTRALE AVEC UNE BANDE COMPOSITE GFRP DE UN (01) M DE LONGUEUR : PRC-1.....	30
<b>FIGURE III.9.</b> POTEAU AVEC UN FERRAILLAGE CLASSIQUE RENFORCE DANS SA PARTIE CENTRALE AVEC UNE BANDE COMPOSITE GFRP DE UN (01) M DE LONGUEUR : PRC-3/2 .....	31
<b>FIGURE III.10.</b> POTEAU AVEC UN FERRAILLAGE CLASSIQUE RENFORCE TOTALEMENT AVEC DU COMPOSITE GFRP (PRC-3).....	32
<b>FIGURE III.11.</b> POTEAU AVEC UN FERRAILLAGE CLASSIQUE RENFORCE AVEC DEUX (02) BANDES COMPOSITES GFRP DE 0,5 M DE LONGUEUR RESPECTIVEMENT, DISPOSEES AUX EXTREMITES DU POTEAU. PRC-2B1/2..	33
<b>FIGURE IV.1.</b> CARTOGRAPHIE DES CONTRAINTES, DEFORMATIONS ET DEPLACEMENTS : POTEAU REF .....	36
<b>FIGURE IV.2.</b> COURBE FORCES – DEPLACEMENTS.....	37
<b>FIGURE IV.3.</b> COURBE FORCES – DEPLACEMENTS DU POTEAU PRC-1 .....	37

<b>FIGURE IV.4.</b> CARTOGRAPHIE DES CONTRAINTES, DEFORMATIONS ET DEPLACEMENTS : POTEAU PRC-1.....	38
<b>FIGURE IV.5.</b> CARTOGRAPHIE DES CONTRAINTES, DEFORMATIONS ET DEPLACEMENTS : POTEAU PRC-3/2.....	39
<b>FIGURE IV.6.</b> COURBE FORCES – DEPLACEMENTS DU POTEAU PRC-3/2.....	39
<b>FIGURE IV.7.</b> CARTOGRAPHIE DES CONTRAINTES, DEFORMATIONS ET DEPLACEMENTS : POTEAU PRC-3.....	40
<b>FIGURE IV.8.</b> COURBE FORCES – DEPLACEMENTS DU POTEAU PRC-3 .....	41
<b>FIGURE IV.9.</b> CARTOGRAPHIE DES CONTRAINTES, DEFORMATIONS ET DEPLACEMENTS : POTEAU PRC-2B1/2.....	42
<b>FIGURE IV.10.</b> COURBE FORCES – DEPLACEMENTS DU POTEAU PRC-2B1/2 .....	43
<b>FIGURE IV.11.</b> CONFRONTATION DES COURBES FORCES – DEPLACEMENTS DES SPECIMENS CONSIDERES .....	43

# *Liste des tableaux*

<b>TABLEAU I-1.</b> LONGUEUR DE FLAMBEMENT $L_F$ EN FONCTION DES LIAISONS AUX APPUIS .....	6
<b>TABLEAU I-2.</b> VALEURS RECOMMANDEES POUR $M1/M2$ .....	11
<b>TABLEAU I-3.</b> VALEURS DU RAYON DE GIRATION.....	11
<b>TABLEAU III.1.</b> CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU MATERIAU BETON .....	34
<b>TABLEAU III.2.</b> CARACTERISTIQUES MECANIQUES DE L'ACIER .....	34
<b>TABLEAU III.3.</b> CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU COMPOSITE (FRP) .....	34

# *Liste des abréviations*

$l_f$  : Longueur de flambement.

$l_0$  : Longueur libre.

$F$  : Vecteur force.

$F_{cr}$  : Charge critique d'Euler.

$E$ : Module de Young.

$I$ : Moment d'inertie de la section du poteau.

$EI$ : Rigidité du poteau.

$\alpha$  : Coefficient de sécurité.

$M$ : Moment du calcul.

$\Lambda$  : Elancement.

$M1, M2$ : Moment du premier ordre aux extrémités.

$\Delta$  : Flèche de second ordre.

$f_c$  : Contrainte de compression.

$f_{cu}$  : Contrainte de compression ultime.

$f_t$  : Limite d'élasticité en traction.

$\varepsilon_c$  : Déformation relative de compression.

$\sigma_{cr}$  : Contrainte critique.

$E1$  : Module de Young longitudinal.

$E2$  : Module de Young transversal.

$\nu$  : Coefficient du poisson.

$\nu_{12}$  : Coefficient de poisson : plan longitudinal/transversal.

$\nu_{13}$  : Coefficient de poisson : plan longitudinal/vertical.

$G_{12}$  : Module de cisaillement sur le plan transversal.

**PRF** : Fiber reinforced polymer.

**GFRP**: Glass fiber reinforced polymer.

**P-Réf** : Poteau référence.

**PRC-1**: Poteau renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite de un (01) m de longueur.

**PRC-3 /2**: Poteau renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite d'un mètre et demi.

**PRC-3:** Poteau renforcé totalement du composite.

**PRC-2B1/2:** Poteau renforcé avec deux bandes composites de 0, 5 m de longueur respectivement, disposées aux extrémités du poteau.

---

---

# *Introduction générale*

---

---

## **Introduction générale**

Par définition le flambement est un phénomène d'instabilité transversale sous un effort de compression. La charge de flambement correspond à une valeur critique de charge de compression. Lorsque la charge appliquée augmente et atteint une valeur critique, l'élément au lieu de se raccourcir, commence à s'infléchir et finira par se rompre. Le mode de rupture obtenu est donc par flambement. En effet, en cas d'instabilité élastique d'un élément de structure, produite par une valeur particulière de chargement (charge critique), les déformations ne sont plus proportionnelles aux efforts appliqués et elles peuvent devenir considérables, ce qui entraîne la rupture de l'élément. La valeur de la contrainte critique est considérée dans ce cas comme un facteur fondamental de dimensionnement des éléments soumis au flambement, surtout pour un matériau ayant une résistance à la compression suffisante, tel que le matériau béton ; ce qui permet d'utiliser une faible section.

En général, le flambement des éléments élancés est finalement un problème de flexion, où l'inertie joue un rôle important dans le phénomène. En effet, plus la colonne est élancée plus la charge critique diminue, aussi, selon la nature des appuis, qu'ils soient articulés ou encastres, le flambement apparaît plus ou moins vite.

Le dimensionnement des colonnes suivant les normes actuelles repose sur les notions suivantes, à savoir , la longueur de flambement ( $L_0$ ) (cette longueur est la longueur de la colonne réduite ou augmentée en fonction des conditions de liaison à ses extrémités) ; les caractéristiques géométriques de la section exprimées par le rayon de giration ( $i$ ) qui exprime l'éloignement de la matière par rapport au centre de gravité de la section et l'élancement structural de la colonne ( $\lambda$ ) définit par le rapport longueur de flambement / rayon de giration .

Le risque de flambement est d'autant plus important que l'élancement est grand. Lorsqu'une pièce élancée est comprimée une flexion parasite se produit à partir d'une certaine contrainte. Cette contrainte est appelée contrainte critique ou contrainte d'Euler. Lors du flambement on se trouve dans le cas de grandes déformations où la linéarité contrainte-déformations n'est plus assurée, on se trouve dans le domaine plastique.

Une des solutions pour contrecarrer le phénomène de flambement est de recourir aux nouveaux matériaux tels que les composites. Beaucoup d'études ont montré l'amélioration de la résistance et de la ductilité des éléments par les composites, utilisés soit comme renforcement ou confinement des éléments.

### **Objectifs du travail**

Les objectifs assignés au présent travail sont résumés comme suit :

- Compréhension du phénomène d'instabilité transversale sous un effort de compression appelé flambement
- Maitrise des méthodes de calcul théoriques
- Etude paramétrique des différents paramètres influents considérés dans le calcul des poteaux en flambement
- Analyse numérique à base des éléments finis et exploitation des résultats pour mieux appréhender le comportement des poteaux sujets au phénomène d'instabilité
- Formuler des conclusions et perspectives adéquates.

### **Structuration du mémoire**

Le mémoire est constitué de quatre chapitres et est terminé par une conclusion générale

- ✓ Le premier chapitre présente une synthèse sur les phénomènes d'instabilité (flambement). Après une *introduction générale* sur le sujet, où la problématique et les objectifs principaux recherchés sont clairement définis, le chapitre 1 est totalement dédié aux définitions et généralités sur le flambement, le classement des poteaux en catégories selon leur élancement, la manière de différencier un poteau court d'un poteau élancé, les fondements théoriques concernant les méthodes de calcul de poteaux en béton armé. ainsi que quelques techniques de renforcement des poteaux par les matériaux composites.
- ✓ Le second chapitre présente des exemples de calcul de poteaux en béton armé soumis à un chargement de compression. L'influence des différents paramètres est déterminée à partir d'une analyse paramétrique à base d'Excel, qui met en évidence l'effet de chaque paramètre et surtout la combinaison des paramètres sur le comportement des éléments soumis au flambement. Une attention particulière est accordée aux effets des différents paramètres influents.

- ✓ Le troisième chapitre regroupe les différentes étapes de simulation numériques à suivre selon le code de calcul à base des éléments finis , en effet, les actions principales permettent de créer la géométrie et les conditions aux limites du modèle ainsi que le fonctionnement du code de calcul par éléments finis sont détaillées. La présentation des variantes d'étude, le maillage ; le mode de chargement ; les conditions limites ;... sont présentés. La modélisation des poteaux est menée dans un espace tridimensionnel.
  
- ✓ Le quatrième chapitre est consacré à la présentation, interprétation et discussion des résultats obtenus. Les évolutions des champs des contraintes, des déformations et de la flèche due au flambement sont illustrées par des graphiques. L'analyse des résultats met en évidence l'influence de renforcement partiel des parties aux voisinages des extrémités par les composites FRP sur le mode de flambement des éléments élancés en béton armé. Une nette amélioration de la résistance est obtenue.

Dans la conclusion générale, l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail sont résumés, ainsi que quelques perspectives d'études dans l'avenir sont proposées.

---

---

**CHAPITRE I : RECHERCHE  
BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE  
FLAMBEMENT**

---

---

## CHAPITRE I : RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LE FLAMBEMENT

### I.1. Introduction

Un poteau est défini comme une membrure soumise à un effort normal de compression important dont la longueur est au moins trois fois la plus petite dimension de la section[1]. Les poteaux soumis à un chargement de compression peuvent être sujets à un phénomène d'instabilité appelé communément flambement. Le danger d'instabilité peut exister dans tous les éléments de structure comprimés. Les poteaux sont classés en trois catégories selon leur élancement :

- ✚ Poteau court.
- ✚ Poteau d'élancement intermédiaire
- ✚ Poteau élancé.

Nous en avons de 3 sortes d'instabilité :

- ✓ flambement (compression pure)
- ✓ déversement (flexion)
- ✓ voilement (torsion)

Les phénomènes d'instabilité peuvent être de 2 types,

- ✓ locaux (barres de treillis, voilement, ...)
- ✓ globaux (flambement d'ensemble, ...)

### I.2. Poteau court :

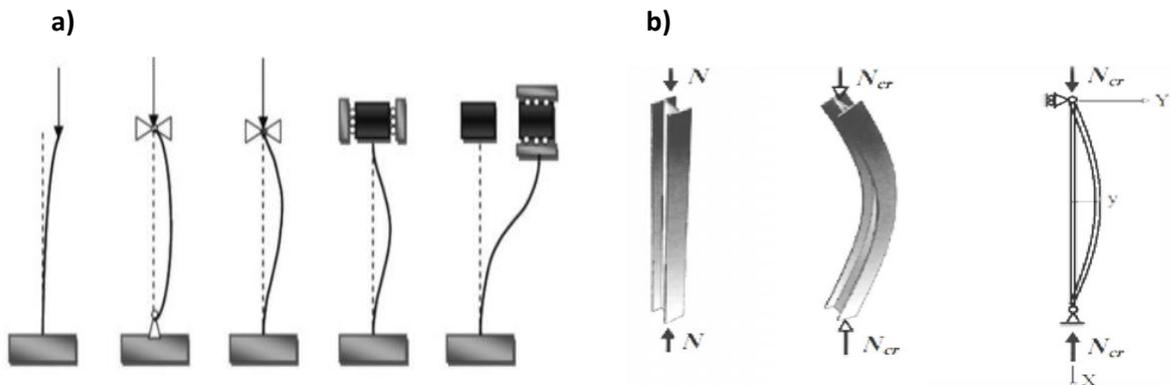
#### I.2.1. Définition

Lorsque la longueur n'est pas supérieure à environ douze fois la dimension latérale minimale ( $H/a \leq 12$ ), ou l'élancement est inférieur à 3, le poteau est donc considéré comme court, dans le cas contraire, il est considéré comme un poteau élancé. Les poteaux courts sont des éléments extrêmement rigides et souvent encastres dans de solides poutres ou sommiers. Ils présentent une grande résistance à la flexion, mais développent des efforts tranchants importants qui provoquent souvent une rupture par cisaillement avant même que le moment plastique ne soit atteint. Sous des excitations sismiques, des fissures diagonales apparaissent dans le béton, dès que la résistance en traction du béton est atteinte, qui se développent sous l'action des charges jusqu'à la rupture des armatures transversales, suivie du flambement des armatures longitudinales (figure I .2) [2].

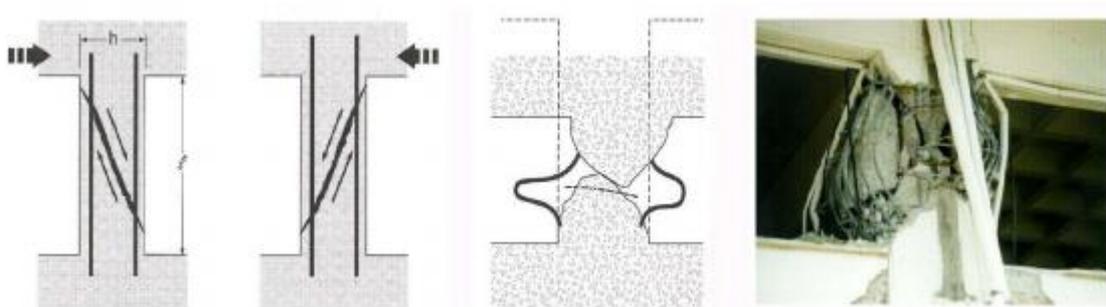
**I.2.2. Phénomène d'instabilité : cas de Flambement**

Le flambement est un phénomène d'instabilité d'une structure, qui soumise à un effort normal de compression, a tendance à fléchir et à se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression [(Laroze & Barrau, 1988)]. Pour le cas des poteaux courts soumis à un chargement de compression, des petites déformations provoquent des moments additionnels négligeables. La rupture se produit généralement par épuisement du matériau (dépassement de la contrainte limite de rupture).

La rupture des poteaux courts est obtenue donc lorsque la contrainte de compression impose au matériau dépasse la contrainte admissible du matériau utilisé [3], Le mécanisme de ruine est caractérisé par l'écoulement de l'acier et l'écrasement du béton. Le mode de rupture est donc brutal et non dissipatif. Ce phénomène est particulièrement observé pour des éléments élancés soumis à des contraintes de compression, au-delà d'une certaine valeur, la charge appliquée conduit à un important changement de forme de la structure qui se traduit par l'apparition brutale ou progressive de plis ou d'ondulations [4].



**Figure I-1.** Phénomène d'instabilité de forme : a) Flambement des colonnes élastiques [5] ;  
b) Flambement simple [6].



**Figure I-2.** Schéma de rupture des poteaux courts [2].

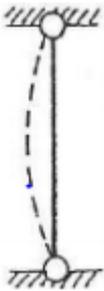


**Figure I-3.** Rupture dans un poteau (Séisme de Boumerdès du 21/05/2003)

### I.3. Longueur de flambement

La longueur de flambement d'un poteau est définie comme étant la distance entre les points d'inflexion de la déformée de son axe, évaluée en fonction de la longueur libre,  $l_0$ , et des liaisons effectives. Elle dépend des conditions d'appuis du poteau à ses extrémités. La longueur libre  $l_0$  d'un poteau d'une structure étagée est égale à la longueur entre faces supérieures de deux planchers consécutifs ou de sa jonction avec la fondation à la face supérieure du premier plancher [7]

**Tableau I-1.** Longueur de flambement  $l_f$  en fonction des liaisons aux appuis [7].

		<b>Longueur de flambement <math>l_f</math> en fonction des liaisons aux appuis</b>					
		Sans déplacement latéral			Avec déplacement latéral		
<b>Cas</b>		A	B	C	D	E	F
<b>Mode de Flambement</b>							
<b>K</b>		<b>1</b> $l_f = l_0$	<b>0.7</b> $l_f = \frac{\sqrt{2}}{2} l_0$	<b>0.5</b> $l_f = \frac{l_0}{2}$	<b>2</b> $l_f = 2l_0$	<b>2</b> $l_f = 2l_0$	<b>1</b> $l_f = l_0$

### I.4. Flambement des poteaux selon les conditions de liaisons aux appuis

#### I.4.1. Poteau articulé à ses extrémités :

Soit un poteau articulé à ses deux extrémités et soumis à une compression pure,  $F$ .  
L'équation de la déformée du poteau est  $EI y'' = -Fy$ .

L'équation différentielle a une solution générale de la forme  $y = A \cos kx + B \sin kx$

Obtenue en posant  $k^2 = F/EI$

Les conditions de liaisons permettent de calculer les constantes d'intégration A et B.

$y = 0$  si  $x = 0$  et si  $x = l_0$ . Alors,  $A = 0$  et  $B \sin kl_0 = 0$ .

$$\sin kl_0 = 0 \longrightarrow kl_0 = n\pi$$

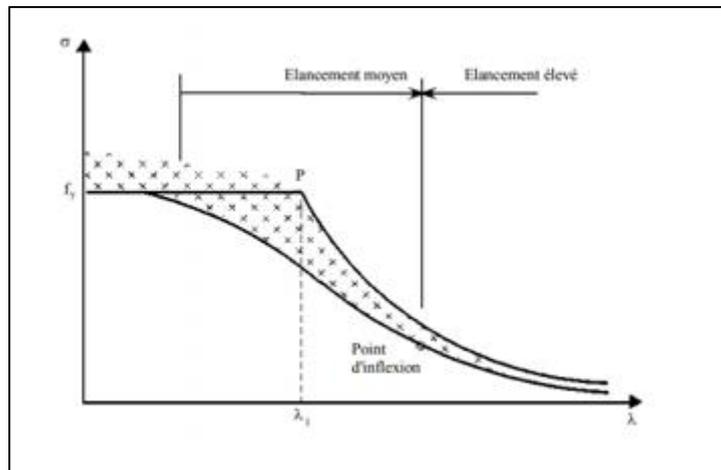
$k^2 = F/EI$  et  $kl_0 = n\pi$ , permettent d'écrire la relation :

$$F_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{min}}{l_0^2}$$

$F_{cr}$  Est donc indépendante de l'amplitude de flèche.

- $F < F_{cr}$ : compression simple, le poteau reste droit, elle est dite en équilibre stable.
- $F = F_{cr}$  : le poteau peut rester droit ou fléchir (flamber) avec une flèche égale à B, elle est dite en équilibre neutre. A noter que  $B = y_{max}$  est en général petit.
- $F > F_{cr}$ : il y a instabilité en position droite (équilibre instable) avec une forte tendance au flambement. B augmentera très rapidement avec un léger accroissement de F [2].

Le flambement se produit suivant un axe perpendiculaire à l'axe du moment quadratique le plus faible. Pour les deux sections représentées,  $I_y < I_z$ , le flambement se produit dans le plan (x, z).



**Figure I-4.** Courbe de flambement d'Euler et courbe réelle [8].

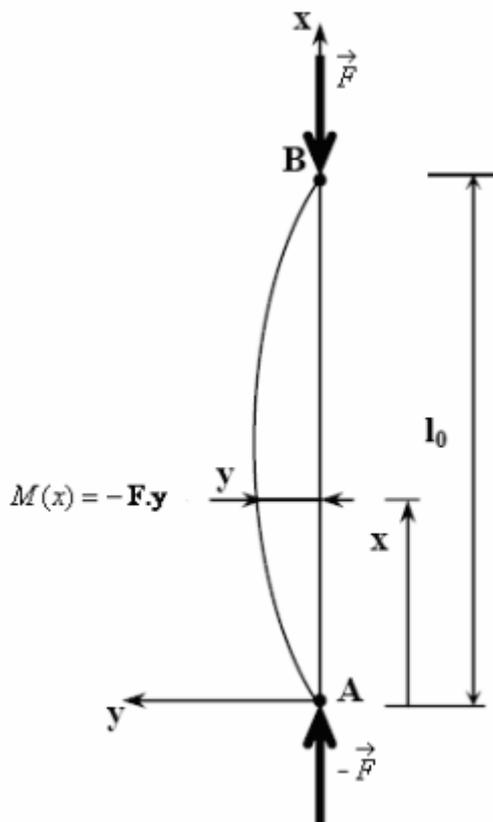
#### I.4.2. Charge critique d'Euler :

La plus petite valeur de F s'obtient pour  $n = 1$  et la relation s'écrit alors :  $F_{cr} = \pi^2 EI / l_0^2$ .

La charge critique de flambement, appelée charge critique d'Euler est tout simplement l'effort normal  $F_{cr}$ . Lorsque l'effort normal dépasse la valeur de  $F_{cr}$ , alors le poteau se déforme et se rompt.

$$\sigma_{cr} = \frac{E \cdot I_{min} \cdot \pi^2}{\lambda^2 \cdot A}$$

$$\sigma_{cr} = \frac{E \cdot \pi^2}{\lambda^2}$$



**Figure I-5.** Poteau droit bi- articulé en compression [7].

A partir de la charge critique, on peut déterminer la valeur de la charge admissible suivant la formule :

$$F = \frac{F_{cr}}{\alpha} ; \text{ avec } \alpha : \text{coefficient de sécurité [9].}$$

**I.4.3. Flèche et courbure à mi- hauteur du poteau :**

Soit  $e_2$  la flèche et  $r$  le rayon de courbure à mi- hauteur du poteau donnant la relation générale

$$1/r = M/EI = e_2 \cdot Fcr / EI$$

Comme  $Fcr = EI\pi^2/L_0^2$  , il apparait que  $e^2 = 1 L_0^2 / r\pi^2$

et l'écriture de cette relation est parfois simplifiée en posant  $\pi^2 = 10$ .

On obtient donc :  $e^2 = 1 L_0^2 / r 10$

**I.4.4. Elancement :**

Le rapport d'élancement est une évaluation de la capacité d'un élément de structure pour supporter le flambage.  $\lambda = lf/i = lf/\sqrt{I/A}$  (sans dimensions)

Où :  $lf$  = longueur de flambement du poteau en mm

$i$  = rayon de giration de la section droite en mm

$I$  = moment d'inertie de la section du poteau dans le plan de flambement en  $\text{mm}^4$

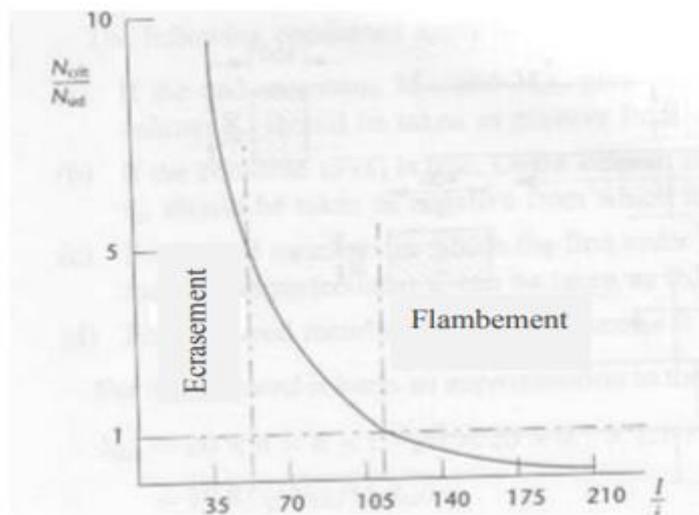
$A$  = section transversale du poteau en  $\text{mm}^2$

Si  $\lambda < 50 \rightarrow$  on a une pièce courte (la pièce ne flambe pas).

Si  $\lambda > 50 \rightarrow$  on a une pièce longue.

**I.4.5. Modes de rupture :**

La rupture des poteaux courts est obtenue généralement par écrasement, mais pour les poteaux élancés elle est obtenue par flambage (Mosley, Hulse, & Bungey, 2012). Pour des poteaux très courts dont l'élancement est inférieur à une certaine valeur limite, la charge de flambement est nettement supérieure à la capacité portante de calcul. Pour des valeurs d'élancement inférieures à 50, la ruine se produit par écrasement, alors que pour des valeurs supérieures à 110, la ruine se produit par flambement. L'effet de l'élancement sur le mode de rupture est illustré par la figure I.6 [10].



**Figure I-6.** Effet de l'élancement sur le mode de rupture [10].

### **I.5. Poteau d'élancement intermédiaire**

Les poteaux de longueur moyenne se comportent inélastiquement et s'effondrent par écoulement partiel de l'acier, écrasement du béton à la compression et fissuration du béton à la traction. La théorie d'Euler ne s'applique pas pour les poteaux d'élancement intermédiaire (moyen) car ils présentent un comportement élasto plastique [Ferhoun]. En effet, la charge ultime ne dépend plus exclusivement de l'élancement [11].

### **I.6. Poteau élancé**

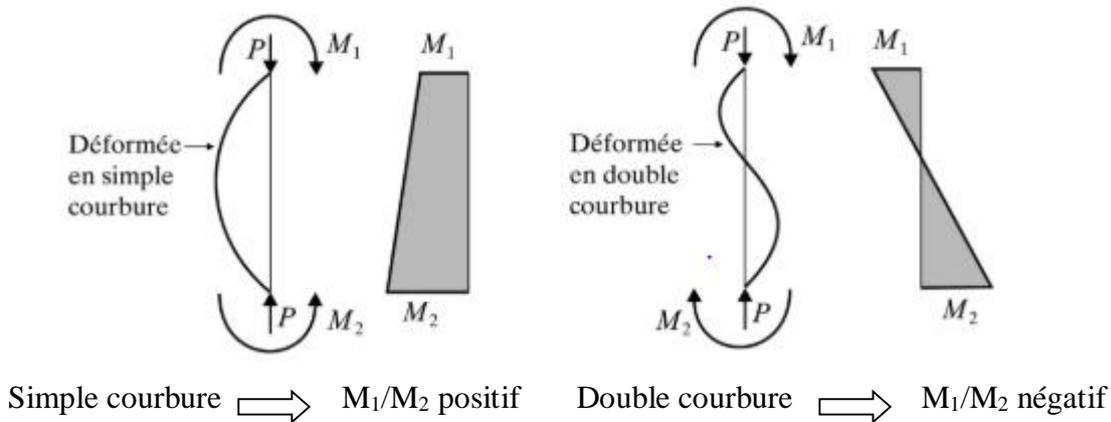
Lorsque l'élancement est supérieur à celui correspondant sensiblement au point d'inflexion de la courbe de flambement, le poteau est considéré comme élancé. L'effort axial ultime de ruine de ces éléments est proche de l'effort axial critique eulérien. La charge de rupture est régie non seulement par la résistance des matériaux et des dimensions de la section transversale, mais aussi par l'élancement, qui produit un moment de flexion supplémentaire dû à des déformations latérales provoquées par flexion. En effet, La déformation en flexion du poteau provoque une excentricité de la charge par rapport à la section critique. Les éléments de structure élancés sont soumis à un effort de compression excentré, pour lesquelles le déplacement transversal peut être important et ceci même sous de faibles charges. En général, une sollicitation composée de flexion et de compression entraînant une instabilité élastique (non linéaire) ce qui peut provoquer une ruine rapide de l'élément. La déformation en flexion du poteau provoque une excentricité de la charge par rapport à la section critique égale à  $(e + \Delta)$ , où,  $\Delta$ , est l'excentricité supplémentaire due à la déviation latérale. Par conséquent, le moment maximal augmente à  $P(e + \Delta)$ . Le moment du second ordre résulte du supplément d'excentricité provenant de l'apparition de la flèche  $\Delta$ .



**Figure I-7.** Poteau élancé sous chargée excentrée [7].

**I.7. Rapport  $M_1/M_2$**

Le signe du rapport  $M_1/M_2$  à adopter est donné à la figure I.7.a. Dans le cas où les calculs ne sont pas faits par une méthode exacte d'analyse, il convient d'adopter les valeurs prudentes recommandées à la figure I.7.b.



**Figure I.8 :** Rapport  $M_1/M_2$

**Figure I.8.a.** Rapport  $M_1/M_2$  déformé en simple courbure

**Figure I.8.b.** Rapport  $M_1/M_2$  déformée en double courbure

**Tableau I-2.** Valeurs recommandées pour  $M_1/M_2$

$M_1/M_2$	Exemple
1,0	Poteau intérieur supportant des travées adjacentes approximativement de même longueur.
0,5	Poteau intérieur supportant des travées adjacentes de longueurs différentes (ex.de chaque côté d'un corridor).
0	Poteau intérieur sous le toit ou au niveau des semelles de fondation
-0.5	Poteau de rive

**Tableau I-3.** Valeurs du rayon de giration

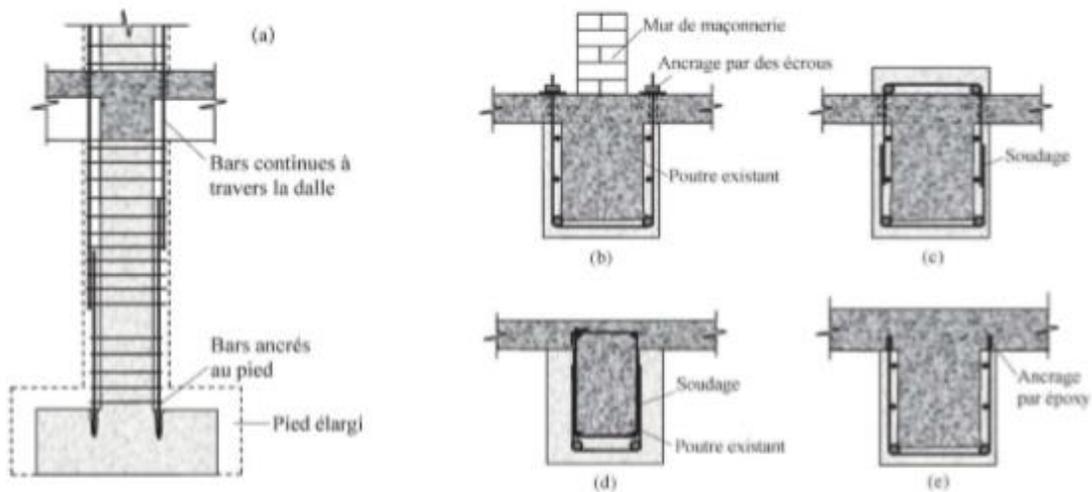
Formule Théorique	valeurs approximatives pratiques	
$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$	$r = 0,3h$	section rectangulaire
	$r = 0,25\phi$	section circulaire de diamètre $\phi$

**I.8. Poteau renforcé par composites**

La technique classique de renforcement du poteau en béton est le chemisage en béton, suivie par le réaménagement des armatures. Elles sont classiques et les coûts matériels ne sont pas élevés. Cependant, l'application de la technique du chemisage en béton est difficile et provoque des perturbations significatives pour les habitants. Dans ce contexte, le confinement

externe des poteaux par chemisage FRP peut être considéré comme une alternative qui peut améliorer de façon significative la résistance au cisaillement, la force axiale et la déformation.

Par rapport aux techniques classiques, la plus faible densité, la résistance à la traction plus élevée, le module d'élasticité, la durabilité et la construction plus aisée, sont les avantages du renforcement par FRP. En raison de ces avantages, l'utilisation des composites de FRP pour renforcer des structures en béton en général et des poteaux en particulier a connu un succès croissant ces dernières années [2].



**Figure I-9.** Techniques de chemisage en béton [2].

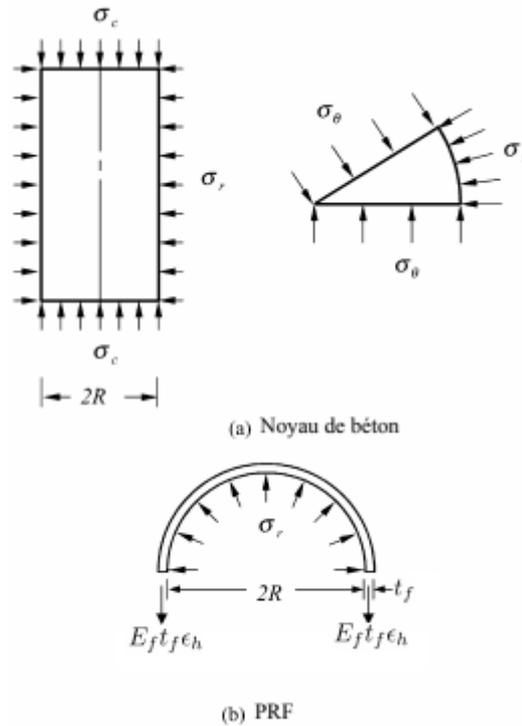
## **I.9. Comportement du béton confiné par composite PRF**

### **I.9. 1. Confinement passif et déformation latérale :**

Afin de comprendre le mécanisme du confinement par PRF, considérons un cylindre chemisé par un composite PRF sous chargement axial. Lorsque le béton est chargé axialement, il se dilate latéralement par l'effet Poisson. En raison de l'interaction entre le béton et le composite, le PRF s'oppose à cette expansion latérale ce qui génère une tension radiale dans le PRF et une pression latérale sur le noyau de béton. L'action du confinement peut être schématiquement représentée sur la figure proposée par Lam et Teng [12].

La pression latérale résultant du composite sur le béton augmente linéairement en raison du comportement élastique linéaire de ce matériau. Ce type de confinement passif à son niveau qui varie avec la déformation latérale.

Une analyse de la dépendance du niveau de confinement avec la déformation latérale peut être explicitée en procédant à un bilan simplifié des efforts dans un cylindre de béton confiné par composite.



**Figure I-10.** Effet de confinement exercé par le composite PRF sur le noyau de béton, Lam et Teng [12].

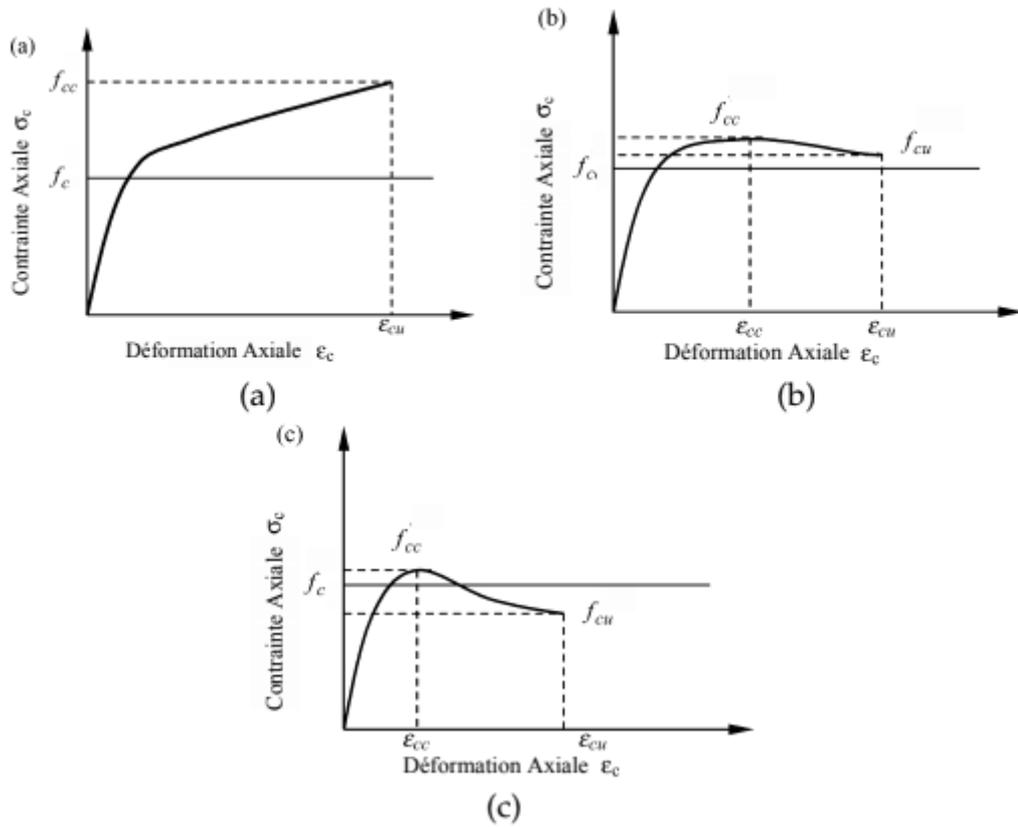
**I.9. 2. Réponse contrainte-déformation d'un béton confiné par composite PRF en compression axiale :**

Dans la littérature, de nombreux essais réalisés par des auteurs tels que Nanni et Bradford, Xiao et Wu, Lam et Teng [12], mettent en évidence trois phases distinctes dans la réponse contrainte-déformation en compression d'un béton confiné par un composite PRF :

- ✓ **Première phase** : correspondant à un niveau de contrainte inférieur à la résistance du noyau du béton, la dilatation latérale du béton est très faible et le confinement est par conséquent négligeable. Le comportement est similaire à celui du béton non confiné. Dans cette phase la pression de confinement latérale n'est pas mobilisée.
- ✓ **Deuxième phase** : des microfissures apparaissent et progressent à travers le noyau, c'est le début d'endommagement et perte de rigidité. La déformation latérale du noyau augmente significativement. C'est le début de la mobilisation de la pression de confinement.
- ✓ **Troisième phase** : la déformation latérale devient assez conséquente et très significative, ce qui permet d'activer l'effet du chemisage par le composite PRF. En effet, la couche composite va exercer une pression radiale pour contrecarrer le développement de la déformation radiale du béton. La réponse du béton confiné dans dépend essentiellement du niveau de confinement, ou du module de confinement.

D'après, Lam et Teng [12], on peut distinguer trois types de comportements différents en fonction du niveau de confinement :

- ✓ un comportement durcissant pour un confinement important,
- ✓ un comportement adoucissant pour  $f_{cu} > f_c$ ,
- ✓ comportement adoucissant pour  $f_{cu} < f_c$ .



**Figure I-11.** Classification des courbes contrainte-déformation d'après Lam et Teng [12].

(a) comportement durcissant, (b) comportement adoucissant pour  $f_{cu} > f_c$ , (c) comportement adoucissant pour  $f_{cu} < f_c$ .

## **I.10. Conclusion du chapitre**

Le flambement est un phénomène d'instabilité transversale sous un effort de compression. La valeur de la contrainte critique est un facteur fondamental de dimensionnement des éléments soumis au flambement. Concernant les éléments élancés, le flambement est évidemment un problème de flexion, où l'inertie joue un rôle important dans le phénomène. Le flambement apparaît plus ou moins vite selon la nature des appuis. Le risque de flambement est d'autant plus important que l'élancement est grand.

Le recours aux matériaux composites, utilisés soit comme renforcement ou confinement, permet de contrecarrer le phénomène de flambement eu égard aux propriétés mécaniques très élevées des composites, en améliorant la résistance et la ductilité des éléments.

Les techniques de renforcement ou de confinement total des poteaux et colonnes par les matériaux composites nécessitent une grande quantité de matériaux, à cet effet, le renforcement partiel, que nous envisageons d'étudier dans ce travail de recherche peut être une solution de substitution au renforcement total. Quelques dispositions et procédés de renforcement des poteaux élancés par les matériaux composites GFRP seront présentés et leurs comportements seront simulés et analysés.

---

---

**CHAPITRE II : EFFETS DES  
PARAMETRES D'ETUDE : 'ANALYSE  
*PARAMETRIQUE*'**

---

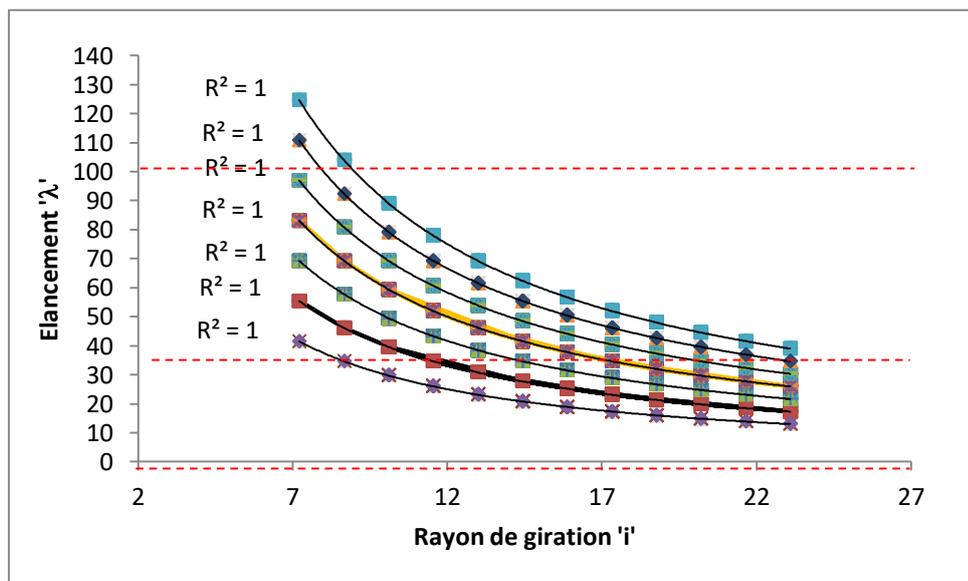
---

## CHAPITRE II : EFFETS DES PARAMETRES D'ETUDE : ANALYSE PARAMETRIQUE

### II. 1. Introduction

Le but de l'analyse paramétrique est de mettre en évidence l'effet de chaque paramètre qui intervient dans les calculs des éléments soumis à un chargement de compression axiale qui induit le flambement. En effet, le calcul est une suite d'expressions mathématiques fonction de plusieurs paramètres, néanmoins l'effet varie d'un paramètre à l'autre. Dans ce chapitre nous présentons les évolutions des effets des paramètres illustrées par des courbes de tendances, sur le comportement des poteaux en béton au flambement et les différentes conclusions formulées. Les différentes expressions mathématiques des paramètres d'étude sont rappelées dans le chapitre I.

### II. 2. Résultats et analyses

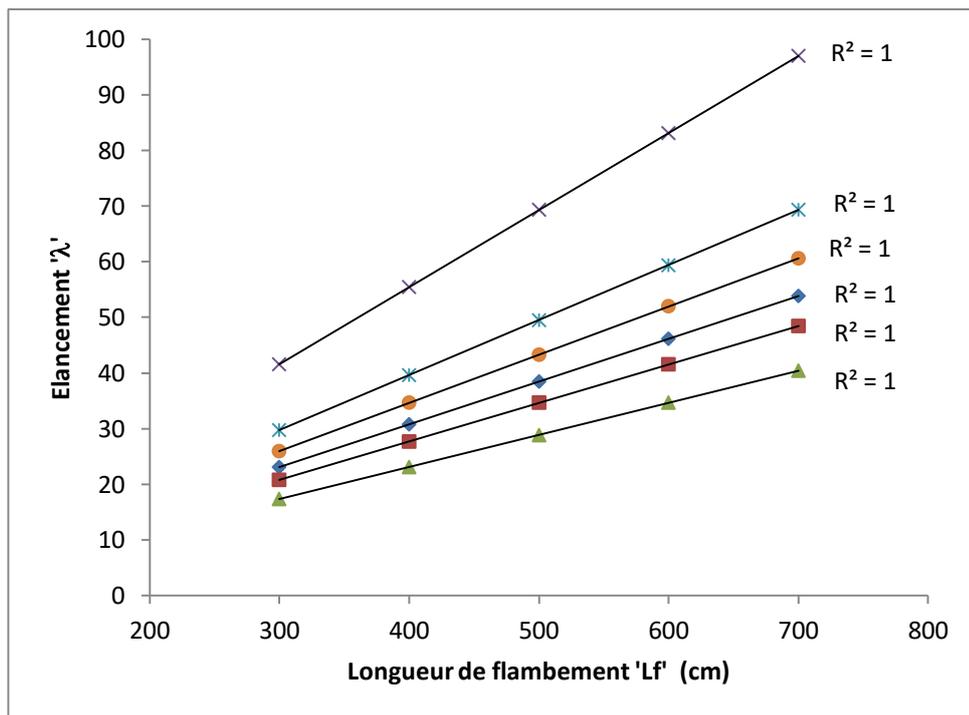


**Figure II.1.** Variation de l'élanement ' $\lambda'$ ' en fonction du rayon de giration ' $i$ ' selon différentes valeurs de la longueur de flambement ' $L_f$ '.

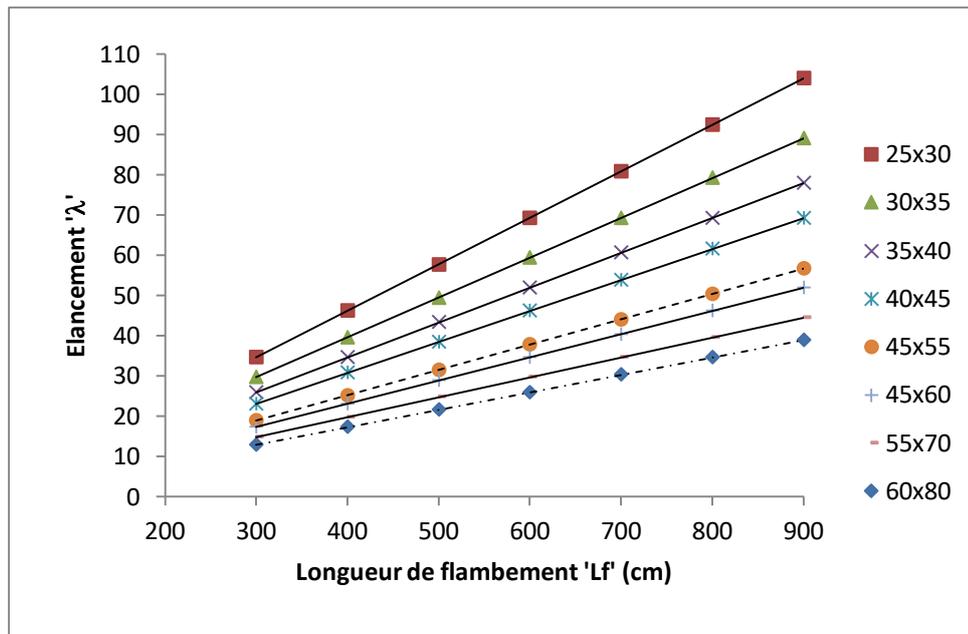
La figure II.1 qui illustre l'évolution de l'élanement ' $\lambda$ ' en fonction du rayon de giration ' $i$ ' selon différentes valeurs de la longueur de flambement ' $l_f$ ' montre que la longueur de flambement est un paramètre influent dans la classification des poteaux courts ou élancés. En effet, pour une même inertie, le poteau est vite considéré comme poteau sujet au flambement,

par contre l'effet de la longueur est réduit par l'augmentation de la valeur du rayon de giration ou tout simplement de l'inertie de la section du poteau. Nous constatons également que l'évolution de l'élanement ' $\lambda$ ' en fonction du rayon de giration ' $i$ ' suit une forme non linéaire et que la pente devient plus raide lorsque la longueur de flambement augmente surtout pour des valeurs d'inertie plus faibles.

Par définition, le rayon de giration est le rapport entre la rigidité à la flexion et la rigidité à la traction-compression. Dans le cas du flambement, il est recommandé de privilégier la rigidité à la flexion. Autrement dit, pour le flambement, à moment d'inertie égal, l'élément qui aura un rayon de giration supérieur résistera mieux au flambement.



**Figure II.2.** Variation de l'élanement ' $\lambda$ ' en fonction de la longueur de flambement ' $l_f$ ' pour le cas des sections carrées

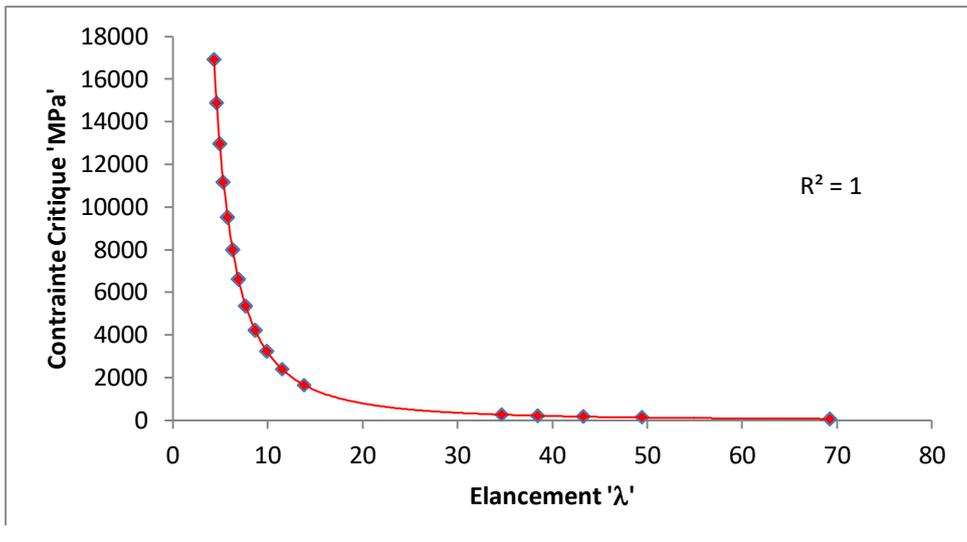


**Figure II.3. Variation de l'élancement 'λ' en fonction de la longueur de flambement 'lf' pour le cas des sections rectangulaires.**

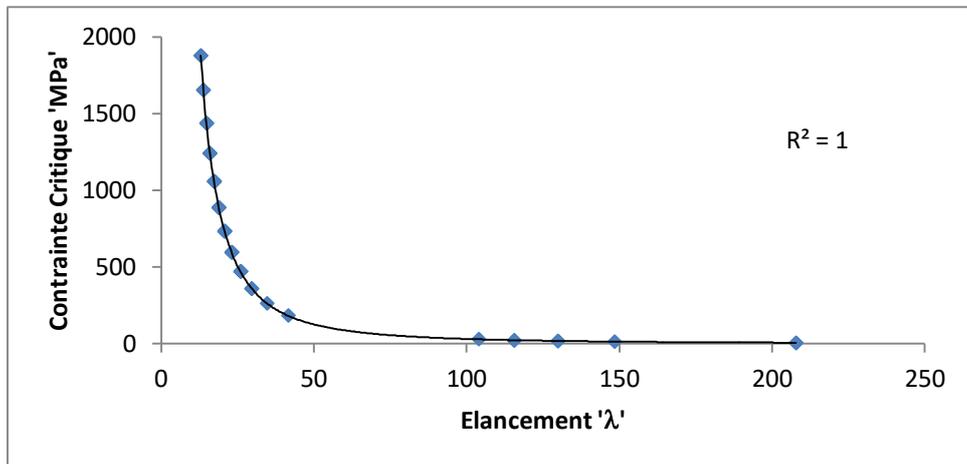
La figure II.2 montre une variation linéaire de l'élancement 'λ' en fonction de la longueur de flambement 'lf' pour le cas des sections carrés. Nous constatons que lorsque la section droite est petite, l'élancement croît rapidement avec la longueur de flambement, par contre pour des sections plus importantes, l'élancement augmente graduellement (la pente est moins raide). Aussi, l'élancement évolue d'une manière proportionnelle par rapport à la longueur de flambement pour toutes les sections carrées.

Pour le cas des sections rectangulaires (Fig II.3), nous remarquons que la variation de l'élancement en fonction de la longueur 'Lf' est toujours linéaire. Cependant pour la même longueur de flambement et en comparant les sections proches, nous constatons que l'élancement est moins important pour les sections rectangulaires comparativement aux sections carrés. A titre indicatif, pour une section carré de 40x40 cm<sup>2</sup> et une section rectangulaire de 35 x40 cm<sup>2</sup>, on a presque la même valeur de l'élancement, soit  $\lambda = 25 - 62$  pour  $L_f = 300-700$  cm.

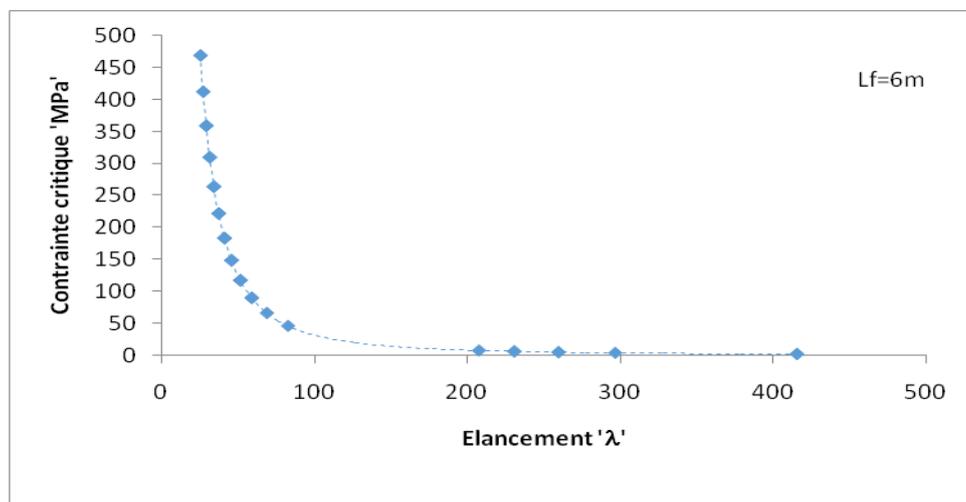
a)



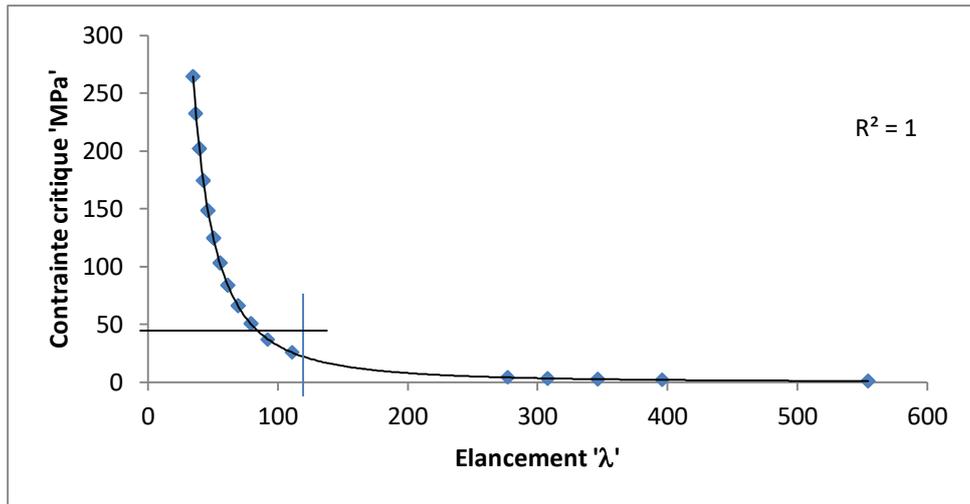
b)



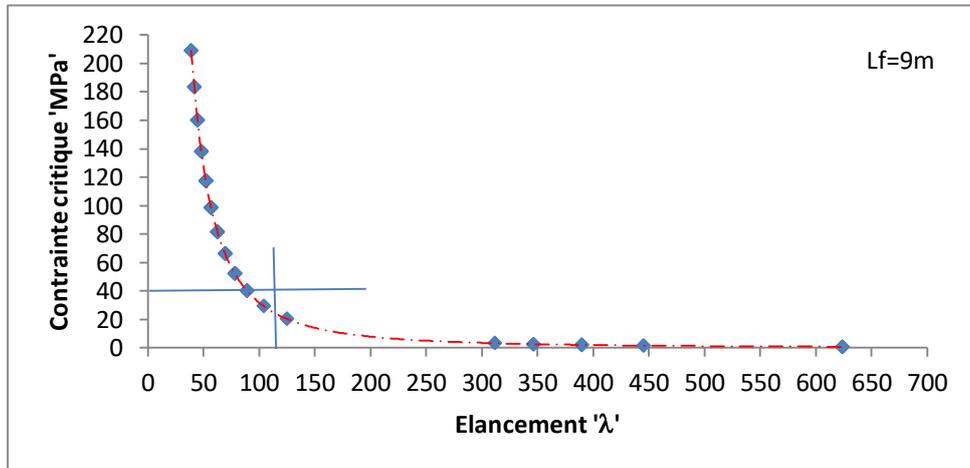
c)



d)



e)



f)

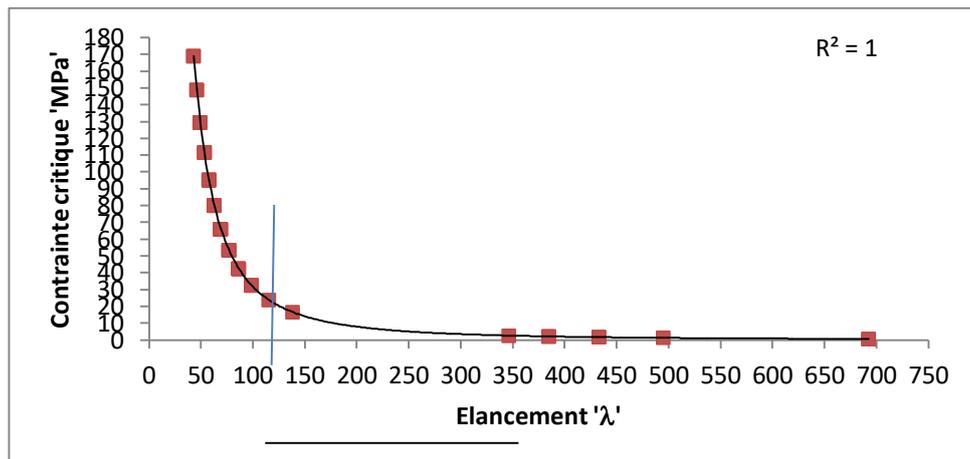


Figure II.4. Contrainte critique en fonction de l'élancement ' $\lambda$ ' pour différentes valeurs de la longueur de flambement ' $l_f$ '.

D'après la figure II.4, on constate que L'allure des courbes est hyperbolique et la contrainte critique d'EULER est inférieure à la contrainte de compression pour un élancement  $\lambda > 110$ .

### **II.3. Conclusion du chapitre**

L'étude paramétrique entreprise met en évidence l'effet de chaque paramètre considéré dans le calcul du flambement des poteaux sous un chargement de compression axiale. Les différents résultats obtenus montrent que la longueur de flambement est un paramètre influent dans la classification des poteaux courts ou élancés. L'évolution de l'élancement ' $\lambda$ ' en fonction du rayon de giration ' $i$ ' suit une forme non linéaire et que la pente devient plus raide lorsque la longueur de flambement augmente surtout pour des valeurs d'inertie plus faibles, en effet, l'élément qui aura un rayon de giration supérieur résistera mieux au flambement.

Lorsque la section droite est petite, l'élancement croît rapidement avec la longueur de flambement, par contre pour des sections plus importantes, l'élancement augmente graduellement (la pente est moins raide). Une étude plus approfondie permettra sans aucun doute de mettre en exergue la prépondérance et l'importance des paramètres considérés et des autres paramètres non étudiés tels que : la section d'armature, la résistance du béton, etc.

---

---

# **CHAPITRE III : RENFORCEMENT**

## **PARTIEL :**

*‘Procédure de simulation et présentation des variantes  
d’étude’*

---

---

## **CHAPITRE III. RENFORCEMENT PARTIEL :** **‘PROCEDURE DE SIMULATION ET PRESENTATION DES** **VARIANTES D’ETUDE’**

### **III.1 .Introduction**

Actuellement, les procédés de mise en forme sont plus étudiés par les codes de calcul à base des éléments finis. Les simulations numériques permettent de mettre au point, des études en réduisant le recours à la méthodologie expérimentale qui est beaucoup plus coûteuse [13]. Le but consiste donc à simuler des phénomènes physiques intervenant en mise en forme des pièces et de jouer sur certains paramètres (géométriques, rhéologiques...) afin d’en optimiser le procédé. Les principaux phénomènes et leurs interactions doivent être correctement pris en compte [14]. Ce chapitre est totalement dédié à la présentation des différentes étapes de la simulation numérique entreprise dans le cadre de l’étude des comportements des éléments élancés en béton armé renforcés par les matériaux composites. Toutes les variantes considérées sont ainsi présentés.

### **III.2 .Présentation du logiciel**

Selon FODILI, ABAQUS est un code de calcul par la méthode des éléments finis, crée en 1978. Il utilise plusieurs modèles de comportements mécaniques pour donner un comportement proche de la réalité et est en général utilisé pour résoudre des problèmes tels que les problèmes de structure (calcul du champ de déformation et de contrainte), de transfert thermique, de mécanique des sols, etc [15]. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. Il se compose de trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS /Explicit et ABAQUS/CAE [16].

Le fonctionnement de ce logiciel est basé sur trois étapes principales :

✓ **Le prétraitement :**

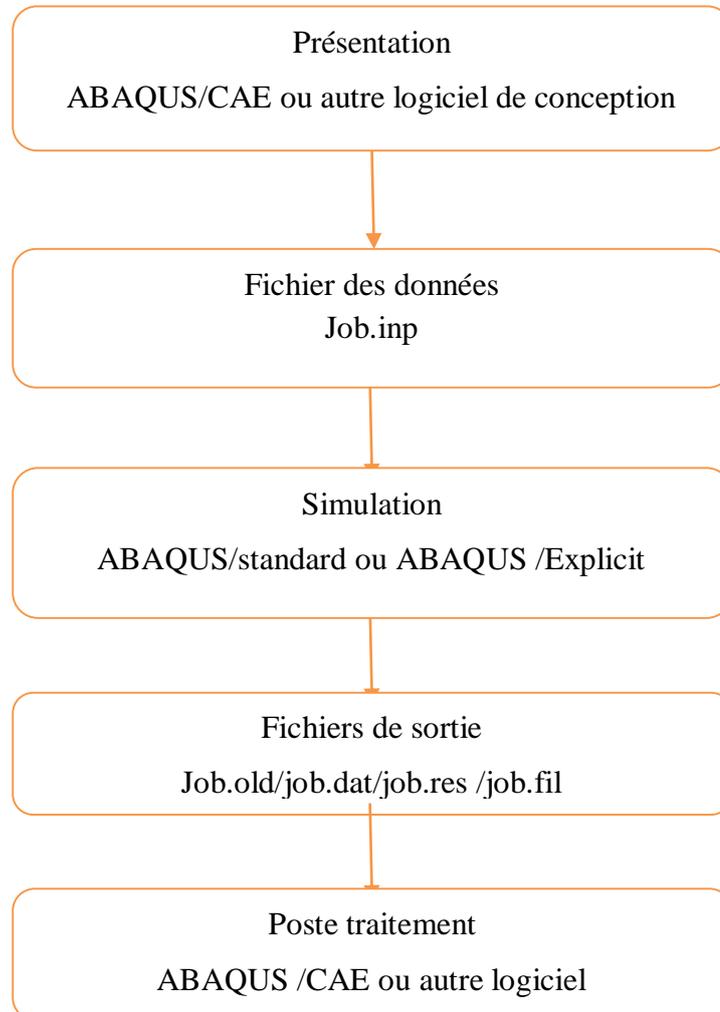
Définition du modèle du problème physique de la pièce ou de la structure à étudier ; le modèle est créé graphiquement en utilisant ABAQUS/CAE.

✓ **La simulation :**

Résolution des équations du modèle, en utilisant soit la méthode standard soit la méthode explicite. Le degré de complexité du problème, la puissance de l’ordinateur et la précision souhaitée définissent le temps de résolution. Les résultats de la résolution sont stockés dans un fichier job.old pour être prêts à l’étape suivante ;

✓ **Le post traitement :**

Calcul des efforts, des déformations, et des contraintes dans les éléments et post traitement graphique (illustration, analyse, coupes, visualisation des champs de déformation et répartition du champ de contrainte dans la structure étudiée, ...etc.).



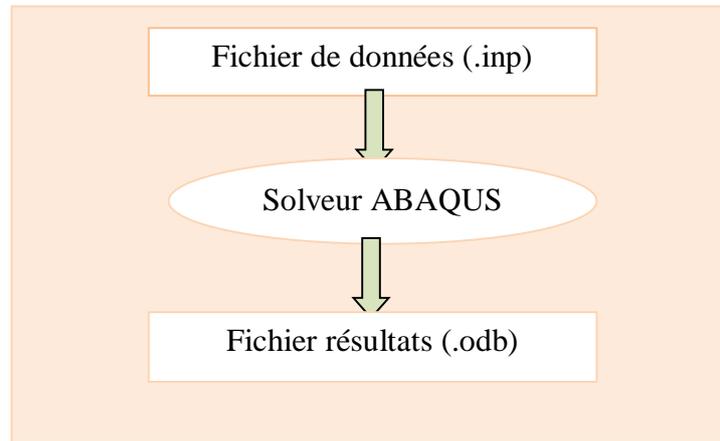
**Figure III.1.** Les étapes essentielles de fonctionnement [17].

### **III.3. Fonctionnement du code ABAQUS**

A partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe.inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, et contient toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc, suivant une syntaxe précise, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées, et fournit les résultats dans un fichier.odb.

Le module ABAQUS / CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

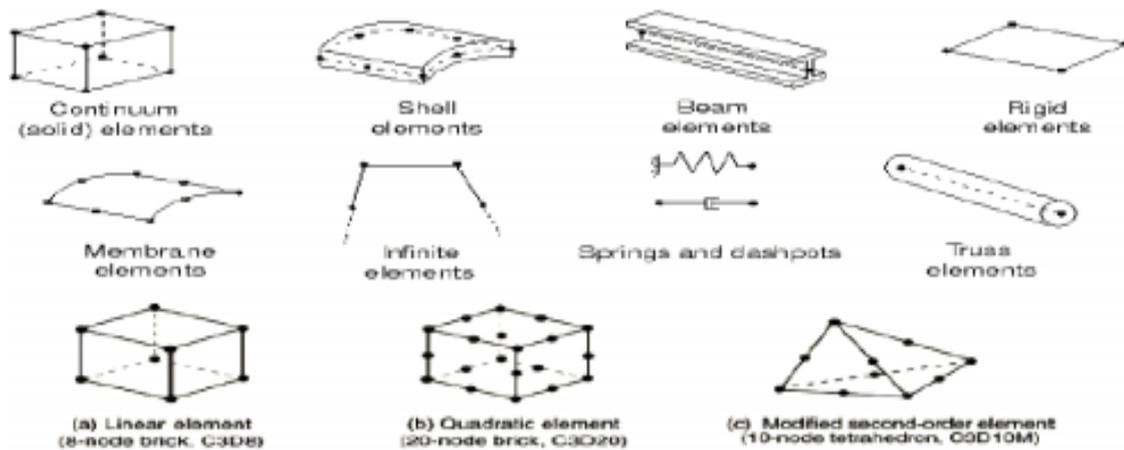
- ❖ La génération du fichier de données.
- ❖ Le lancement du calcul proprement dit.
- ❖ L'exploitation des résultats.



**Figure III.2.**Fonctionnement du code ABAQUS [18].

**III.3.1. Les éléments :**

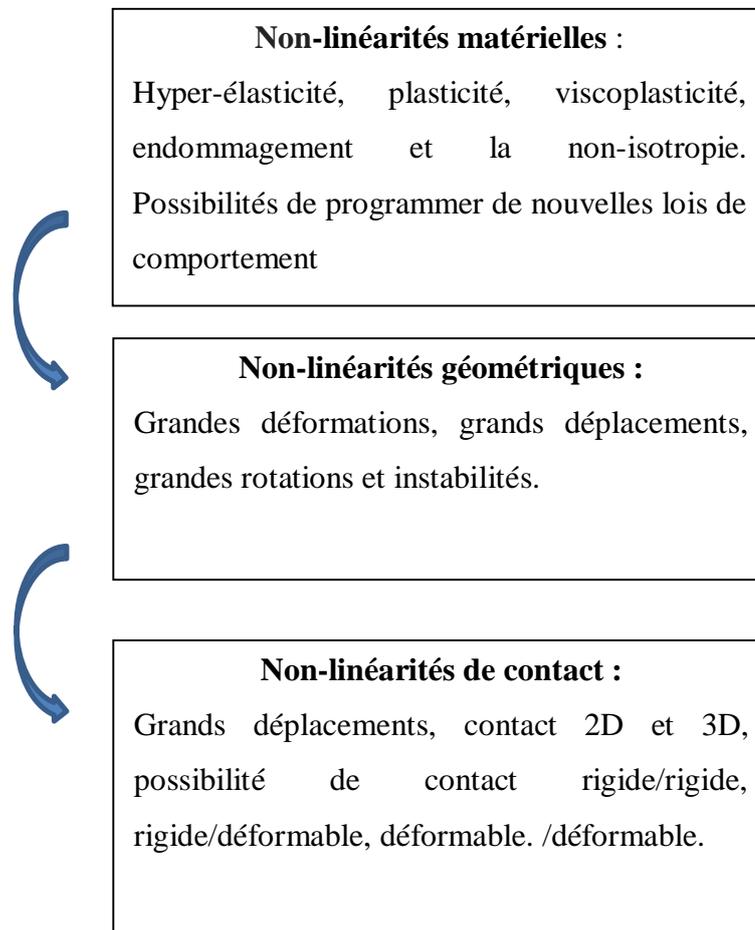
Le logiciel contient un très large choix d'éléments (plus de 100) et la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN sur ABAQUS/Standard).



**Figure III.3.** Quelques éléments modélisés sur ABAQUS [18].

### **III.3.2. Types de non linéarité :**

Les différentes non-linéarités sont résumés comme suit ;

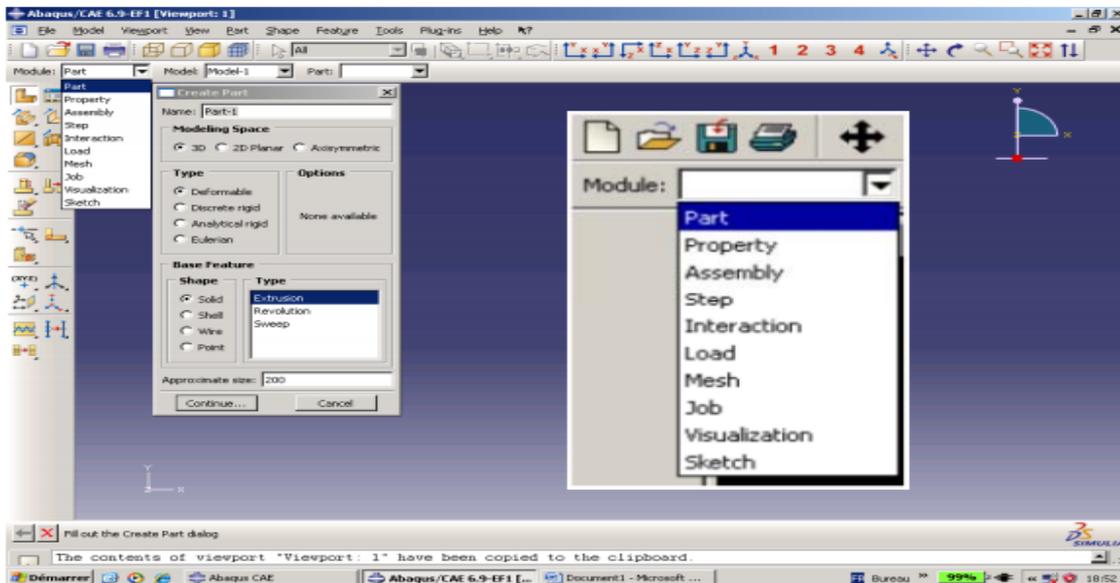


### **III. 4. Présentation de l'interface ABAQUS /CAE**

ABAQUS/CAE se présente sous la forme d'une interface graphique divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation. La commande : abaqus/cae est exécuté en entrant simplement Les modules d'ABAQUS .la commande « Module » rassemble la présentation géométrique, l'affectation des propriétés mécaniques au modèle, l'assemblage de plusieurs entités géométriques en une seule, le chargement imposé et les conditions aux limites, le choix du maillage et des éléments finis. Les différents modules sont résumés comme suit :

✓ **Le module « PART » :**

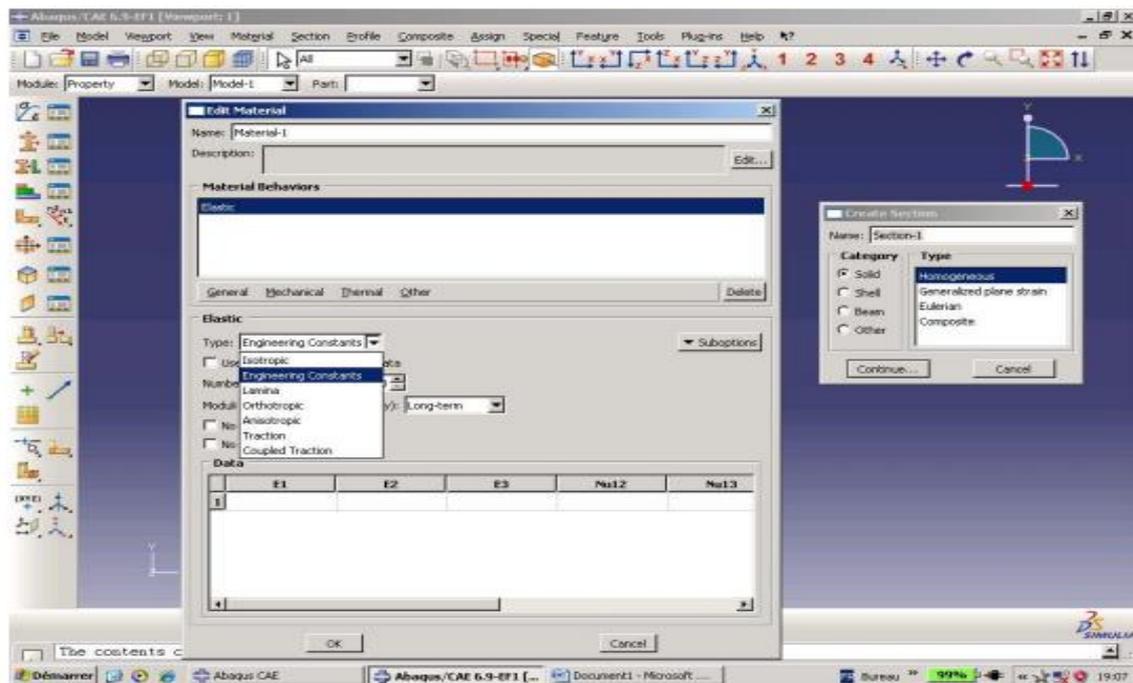
Permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème, soit en les dessinant dans ABAQUS / CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.



**Figure III.4.** Le module « Part ».

✓ **Le module « PROPERTY » :**

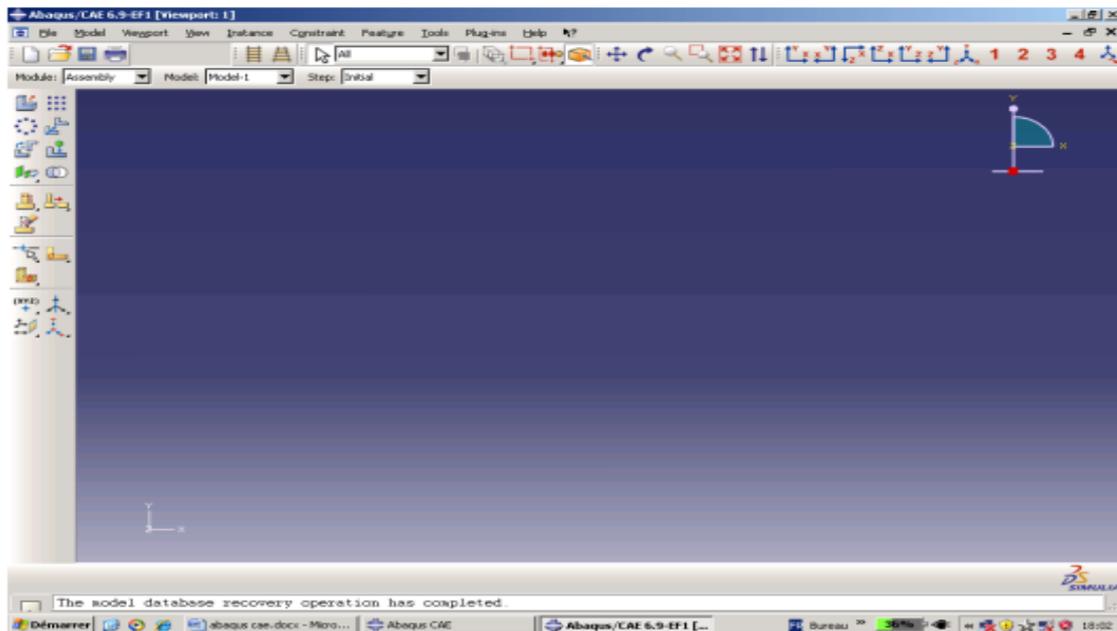
Permet d'effectuer toutes les propriétés du matériau à l'objet géométrique ou une partie de l'objet.



**Figure III.5.** Le module « Property ».

✓ **Le module « ASSEMBLY » :**

Permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.



**Figure III.6.** Le module « Assembly ».

✓ **Le module « STEP » :**

Permet de définir toutes les étapes pour le post traitement, c'est-à-dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

✓ **Le module « INTERACTION » :**

Permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres.

✓ **Le module « LOAD » :**

Permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites, et champs de déplacement.

✓ **Le module « MESH » :**

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage.

✓ **Le module « JOB » :**

Après la réalisation de toutes les tâches de définition du modèle, le module « Job » permet de réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

✓ **Le module « VISUALIZATION » :**

Permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations, etc.

✓ **Le module « SKETCH » :**

Permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associées à un objet.

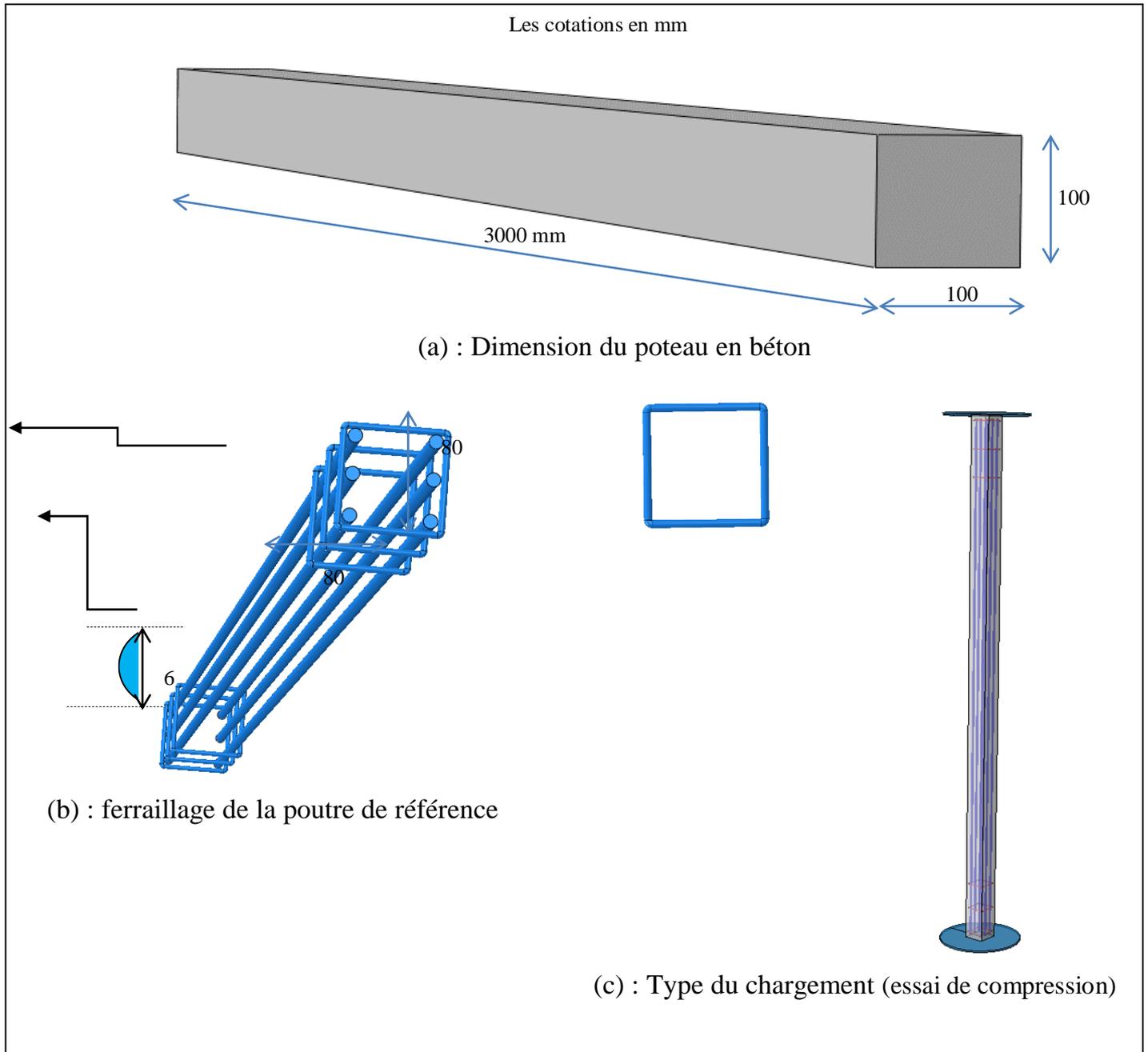
### **III. 5. Présentation des modèles à simuler**

Dans ce travail, nous allons simuler des poteaux en béton armé de dimensions 10 x10x 300 soumis à un charge de compression centrée. Les poteaux sont ferrailés avec six (06) barres longitudinales de  $\phi$  6 mm et six (06) cadres transversaux disposés aux extrémités du poteau. Plusieurs variantes sont considérées :

- ✓ Poteau avec un ferrailage classique, considéré comme poteau de référence. (contrôle) ;
- ✓ Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de un (01) m de longueur ; PRC-1
- ✓ Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de un mètre et demi(1,5) m de longueur ; PRC-3 /2
- ✓ Poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP ; PRC-3
- ✓ Poteau avec un ferrailage classique renforcé avec deux (02) bandes composites GFRP de 0,5 m de longueur respectivement, disposées aux extrémités du poteau. PRC-2B1/2

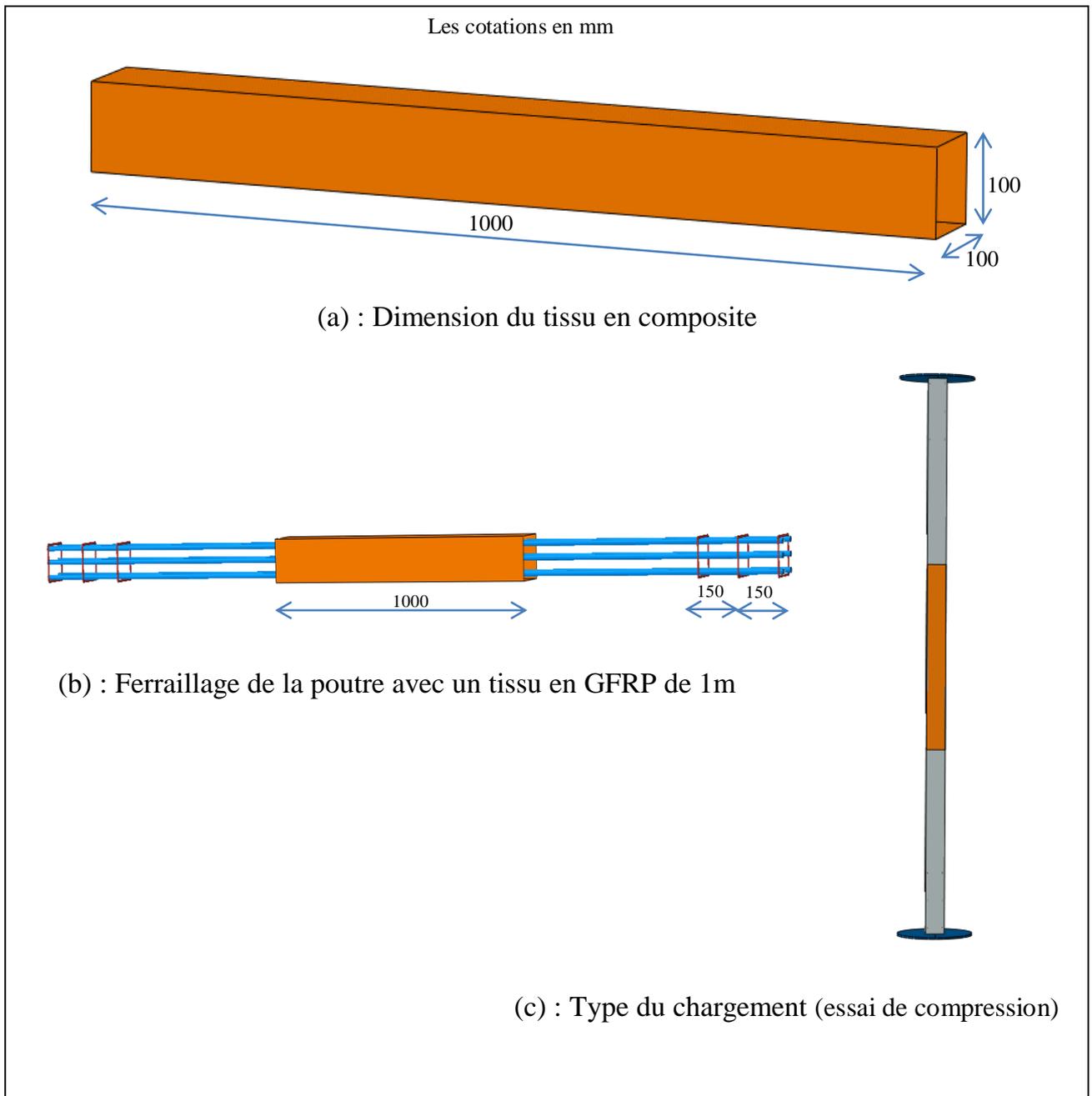
Les différentes variantes de poutres, la géométrie, le maillage considéré et le mode de chargement sont illustrés par les figures suivantes :

**III. 5. 1. Poteau avec un ferrailage classique, de référence : (P-Réf)**



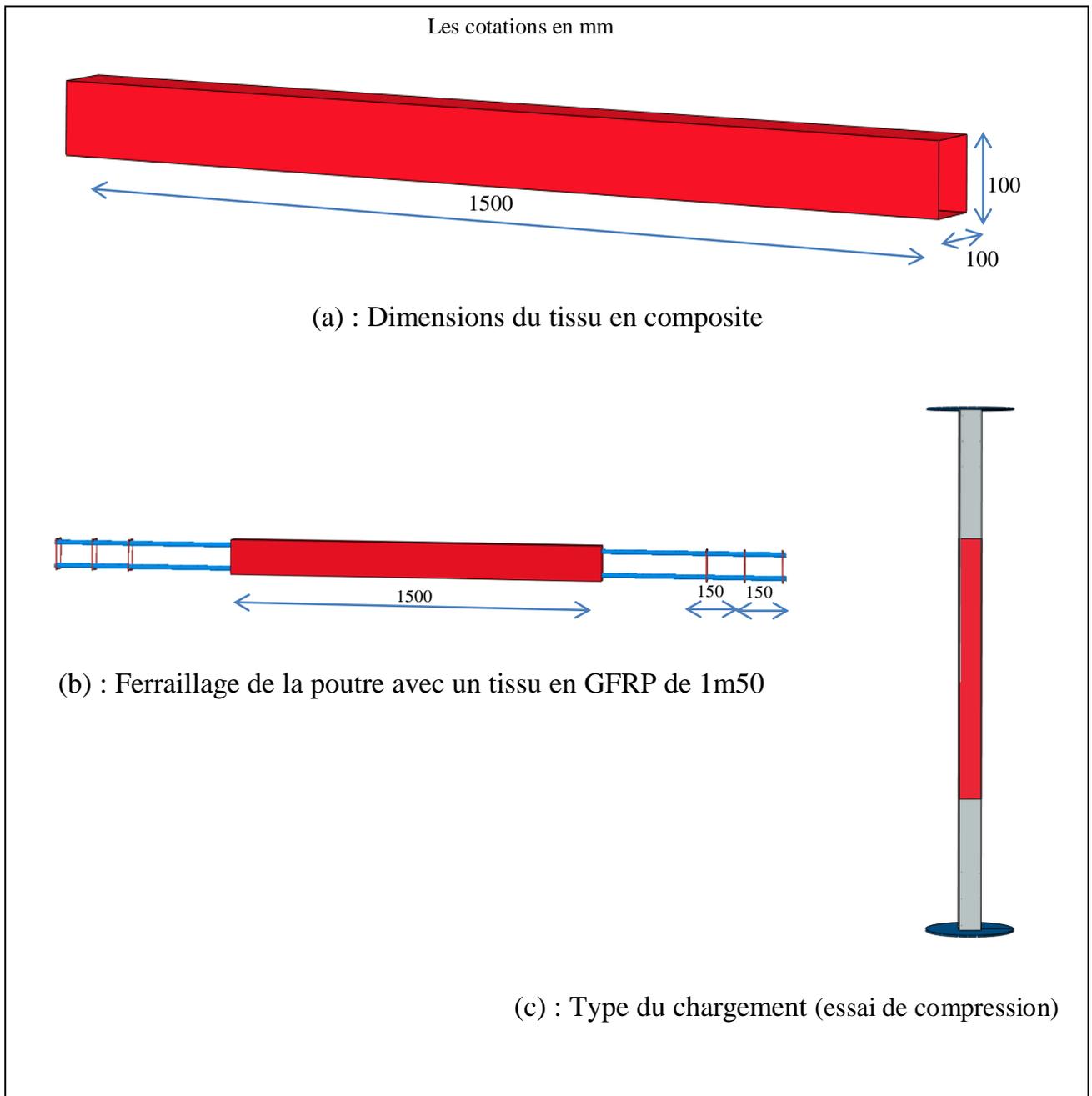
**Figure III.7.** Poteau avec un ferrailage classique, de référence : (P-Réf)

**III. 5. 2. Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de un (01) m de longueur : PRC-1**



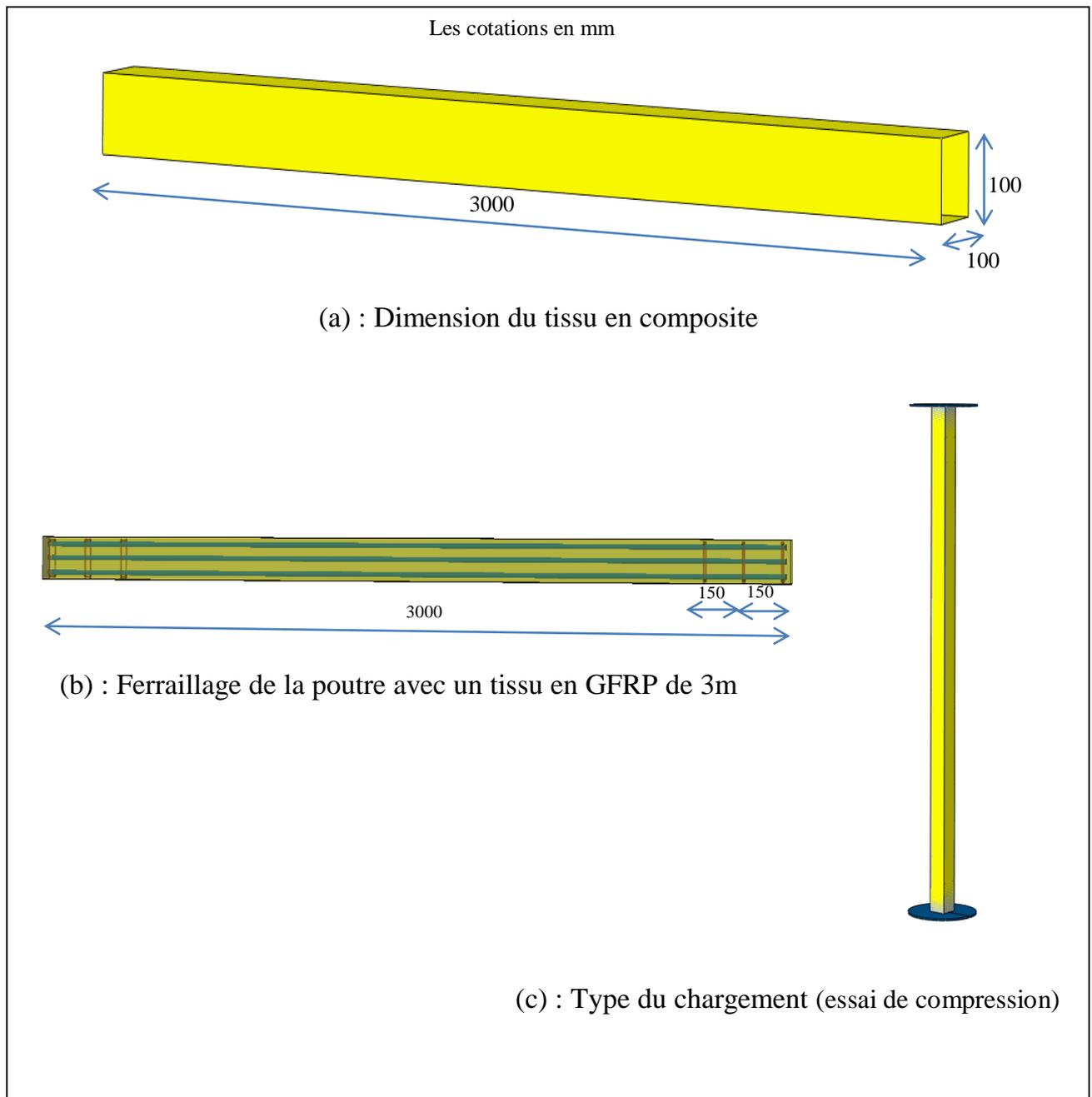
**Figure III.8.**Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de un (01) m de longueur : PRC-1

**III. 5. 3. Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de 1,5 m de longueur : PRC-3/2**



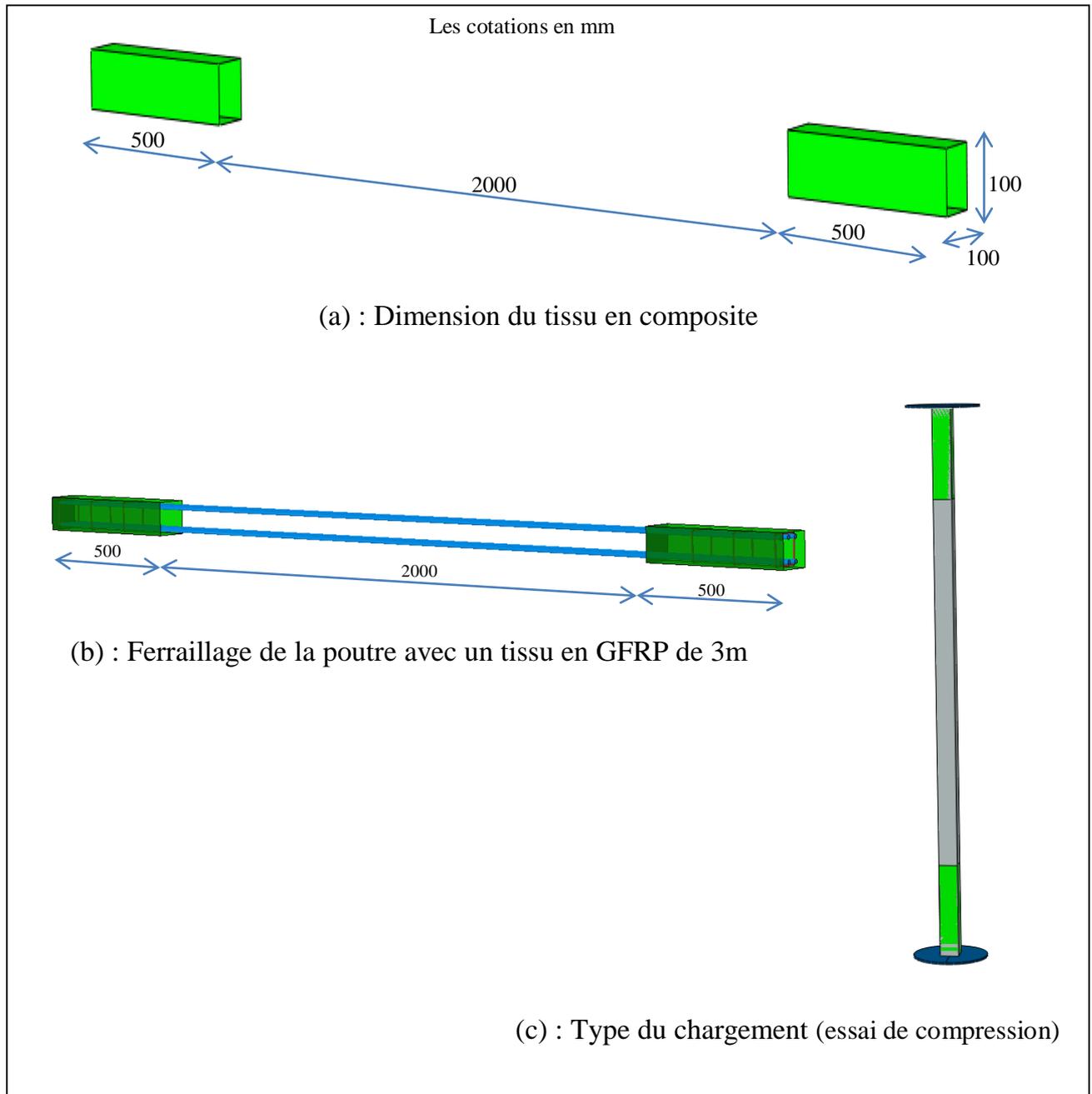
**Figure III.9.** Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de un (01) m de longueur : PRC-3/2

**III. 5. 4. Poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP : PRC-3**



**Figure III.10.** Poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP (PRC-3)

**III. 5. 5. Poteau avec un ferrailage classique renforcé avec deux (02) bandes composites GFRP de 0,5 m de longueur respectivement, disposées aux extrémités du poteau. PRC-2B1/2**



**Figure III.11.** Poteau avec un ferrailage classique renforcé avec deux (02) bandes composites GFRP de 0,5 m de longueur respectivement, disposées aux extrémités du poteau. PRC-2B1/2

**III. 6. Caractéristiques mécaniques**

Les différentes caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés, le béton et l'acier, sont données dans les tableaux III.1 ; III.2 et III.3.

**Tableau III.1.** Caractéristiques mécaniques du matériau béton

Propriétés	Charge uni-axial	Béton
Contrainte de compression	$f_c$ [Mpa]	25
Module du Young	$E_c$ [Mpa]	3216,5
Coefficient du poisson	$\nu$	0.2
Limite d'élasticité en traction	$f_t$ [Mpa]	2,1

**Tableau III.2.** Caractéristiques mécaniques de l'Acier

Propriétés	Charge uni-axiale	Acier
Contrainte de traction	$f_s$ [Mpa]	240
Module du Young	$E_c$ [Mpa]	210000
Coefficient du poisson	$\nu$	0.3

**Tableau III.3.** Caractéristiques mécaniques du composite (FRP)

Paramètres	Valeur	Dénotation
$E_1$ (MPa)	72000	Module de Young longitudinal
$E_2$ (MPa)	13600	Module de Young transversal
$\nu_{12}$	0.31	Coefficient de poisson : plan longitudinal/transversal
$\nu_{13}$	0.33	Coefficient de poisson : plan longitudinal/vertical
$G_{12}$ (MPa)	4700	Module de cisaillement sur le plan transversal

### **III. 7. Conclusion du chapitre**

Le recours aux techniques de simulation numérique permet d'une part une meilleure fiabilité de la structure vis-à-vis des différentes sollicitations mécaniques et un gain de temps d'étude et de conception (économie).

Les différentes techniques de renforcement des poteaux par les composites considérées dans ce travail sont proposées dans le but d'étudier l'influence du renforcement partiel sur la capacité portante, la ductilité et le mode de flambement des poteaux.

---

---

**CHAPITRE IV : PRESENTATION  
DES RESULTATS ET ANALYSES**

---

---

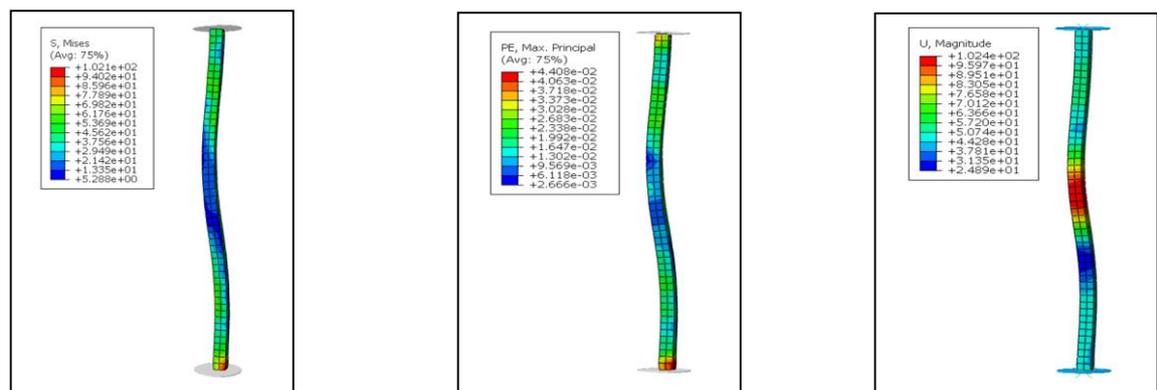
## CHAPITRE IV : PRESENTATION DES RESULTATS ET ANALYSES

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats de la simulation numérique des modes de flambement des différents spécimens considérés. Le but est de montrer l'influence du type de renforcement ou/et de confinement des poteaux par des composites FRP sur le mode de flambement, à travers les cartographies des évolutions des champs des contraintes, des déformations, des déplacements et les courbes forces – déplacements des différents poteaux considérés dans notre travail.

### IV. 2. Présentation des résultats et analyses

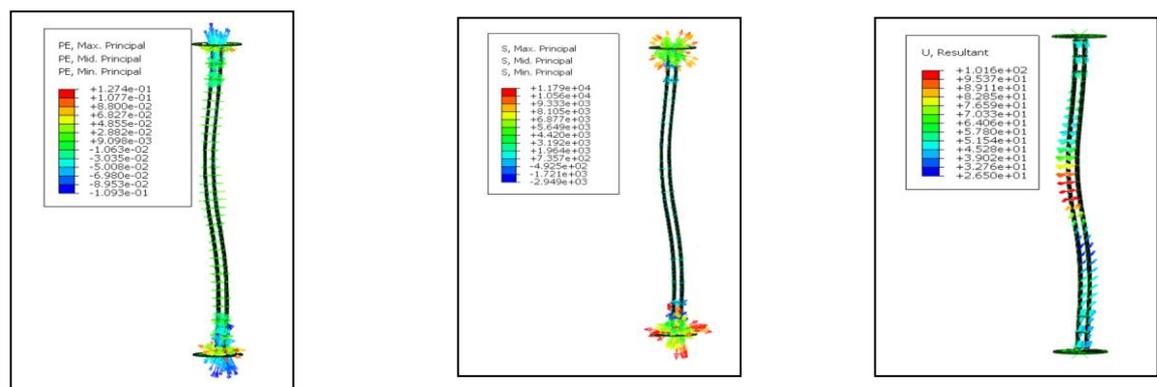
#### IV.2.1. Poteau avec un ferrailage classique (P-Réf) :



b) Evolution des contraintes

c) Evolution des déformations

a) Evolution des déplacements

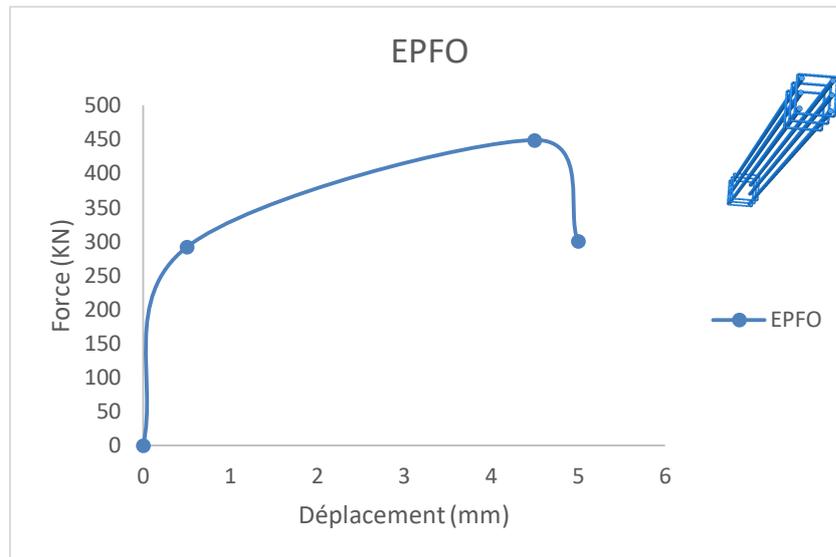


e) Evolution des champs de contraintes dans les armatures

d) Evolution des champs des déformations dans les armatures

f) Evolution des champs des déplacements dans les armatures

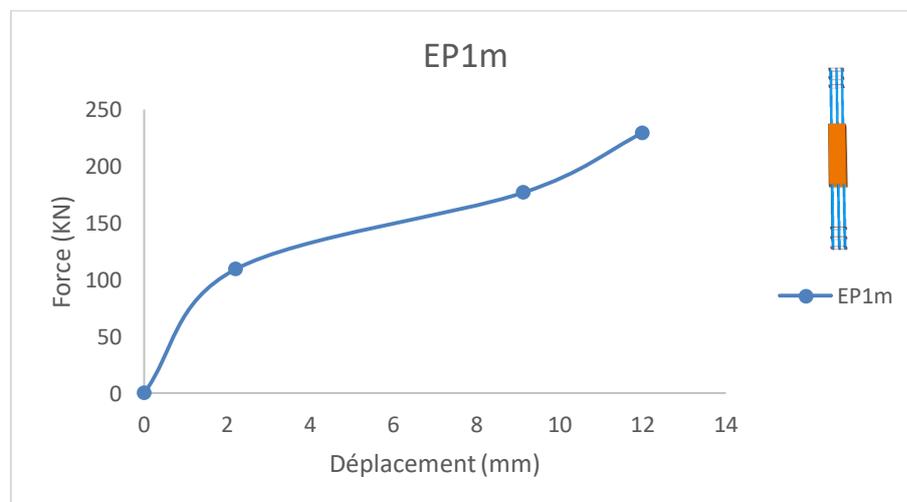
Figure IV.1. Cartographie des contraintes, déformations et déplacements : Poteau Ref



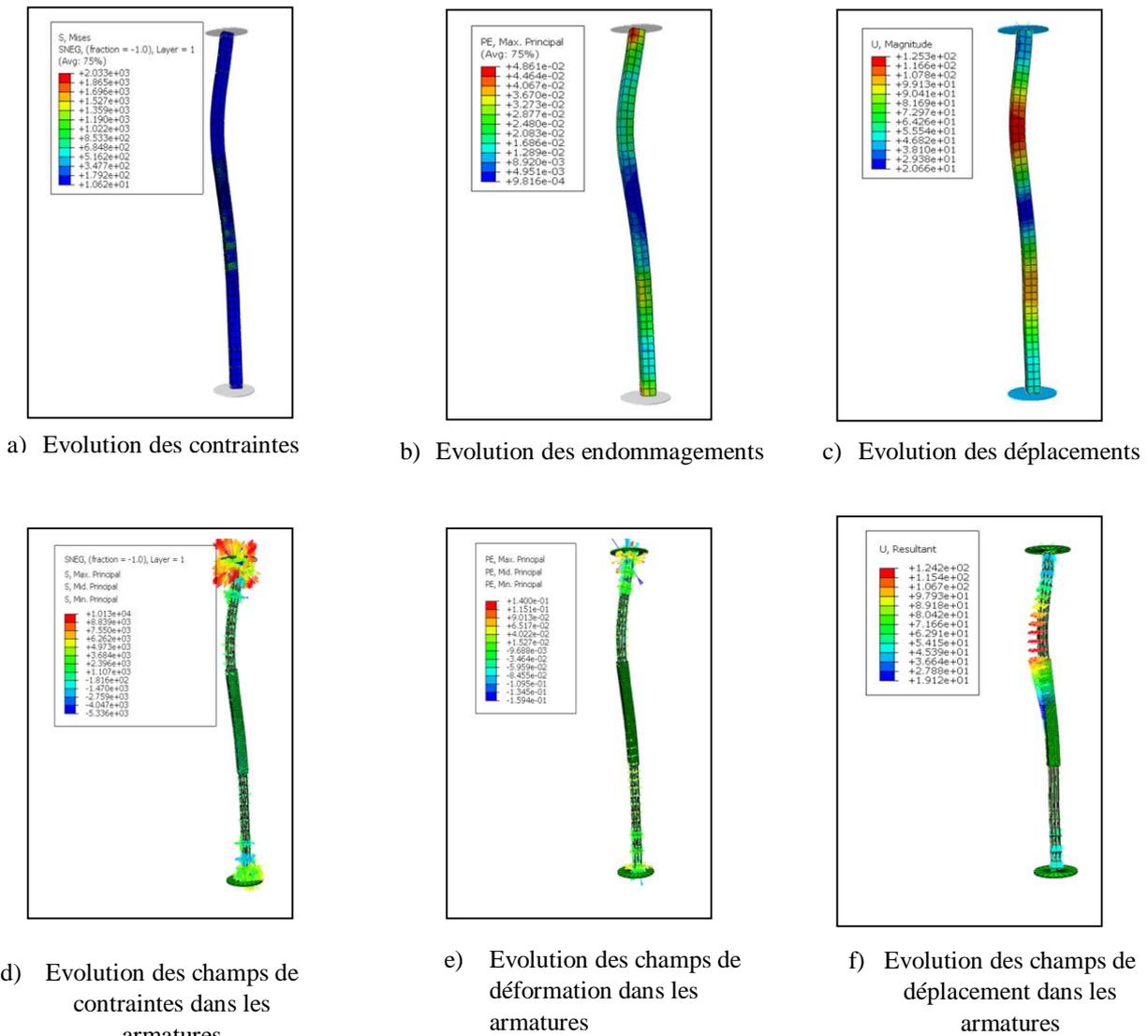
**Figure IV.2.** Courbe forces – déplacements

Les figures IV.1 et IV.2 illustrent les évolutions et champs de contraintes, déformations et des déplacements. On observe un déplacement (flèche de courbure) maximal au niveau de la partie centrale à mi-hauteur du poteau. Comme le poteau est encasturé, on observe une concentration des contraintes aux niveaux des extrémités, mais la courbure est plus importante au milieu du poteau bien que le type de flambement obtenu est très proche du mode II. A partir d’une charge d’environ de 290 kN, le déplacement à mi-hauteur croit rapidement jusqu’à atteindre une valeur limite de 4,5 mm pour une charge ultime de rupture de 449,13 kN.

**IV.2.2. Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de un (01) m de longueur : PRC-1**



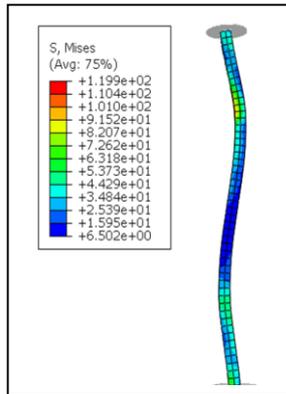
**Figure IV.3.** Courbe forces – déplacements du poteau PRC-1



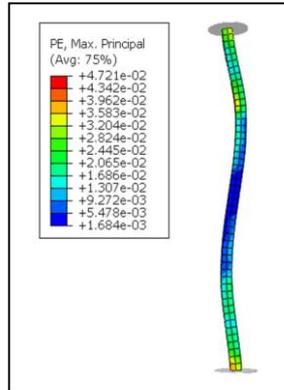
**Figure IV.4.** Cartographie des contraintes, déformations et déplacements : Poteau PRC-1

On observe le même mode II de flambement obtenu pour le poteau de référence, cependant la concentration des contraintes et le déplacement maximal sont obtenus dans la partie non renforcée du poteau, proche des extrémités. La figure IV.3 montre que le comportement en terme de force – déplacement est plus ductile et la rupture est obtenue pour un déplacement plus important mais sous un chargement plus faible, en effet, le déplacement max est de 12mm est produit par une charge de 229,23 kN. Le renforcement de la zone centrale n’améliora pas la résistance mais affecte le déplacement.

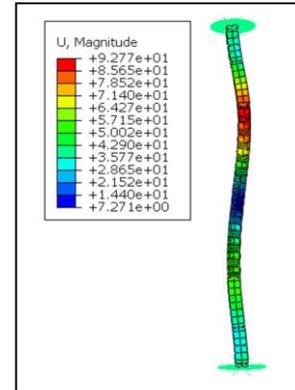
IV.2.3. Poteau avec un ferrailage classique renforcé dans sa partie centrale avec une bande composite GFRP de 1,5 m de longueur : PRC-3/2



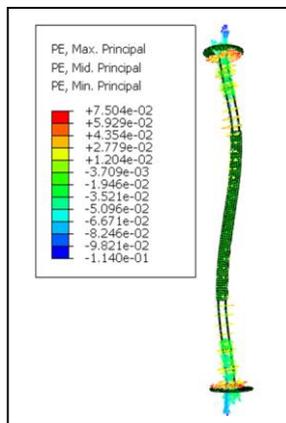
a) Evolution des contraintes



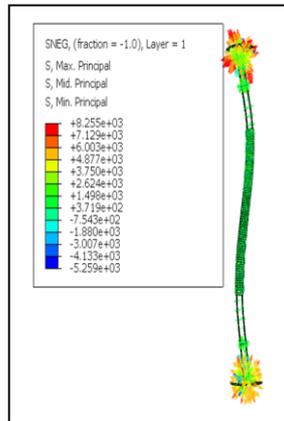
b) Evolution des déformations



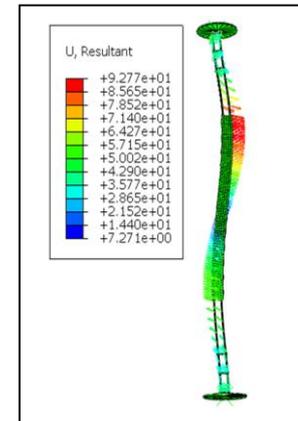
c) Evolution des déplacements



d) Evolution des champs de déformations dans les armatures



e) Evolution des champs des contraintes dans les armatures



f) Evolution des champs des déplacements dans les armatures

Figure IV.5. Cartographie des contraintes, déformations et déplacements : Poteau PRC-3/2

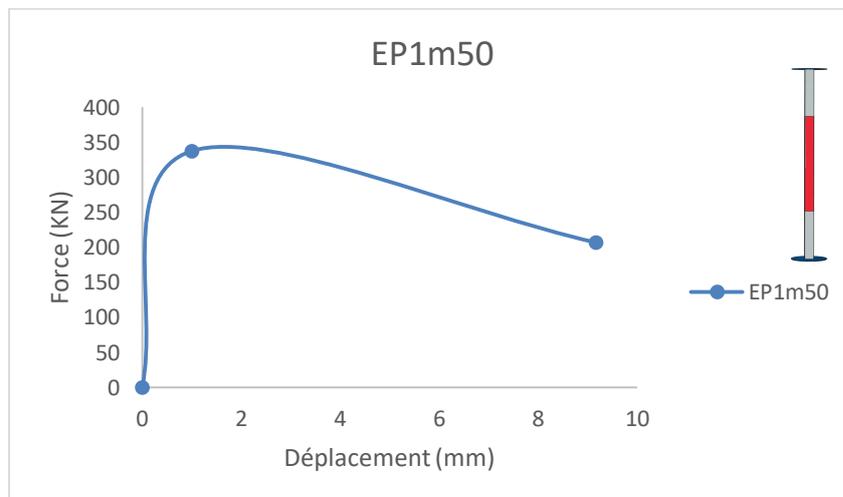
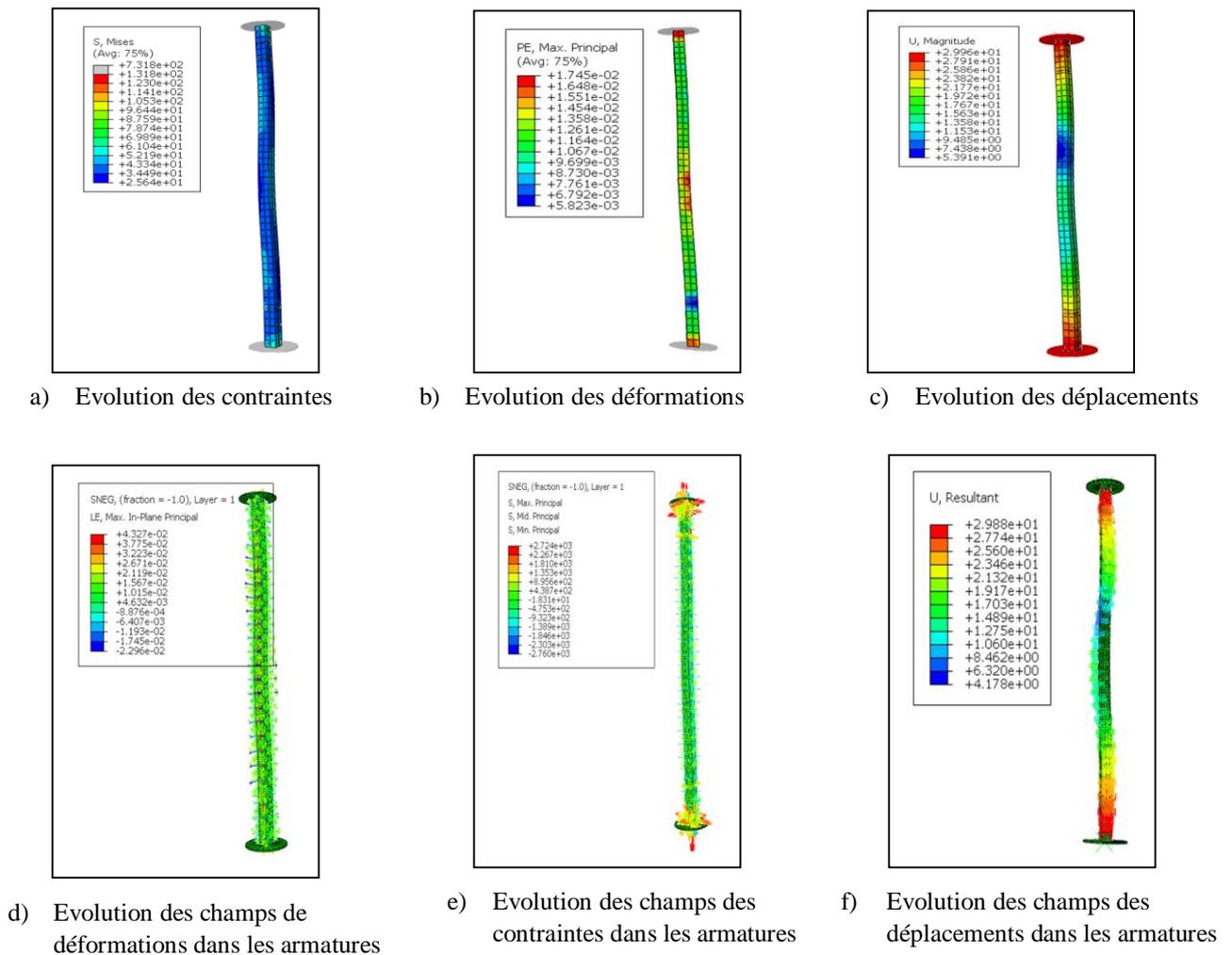


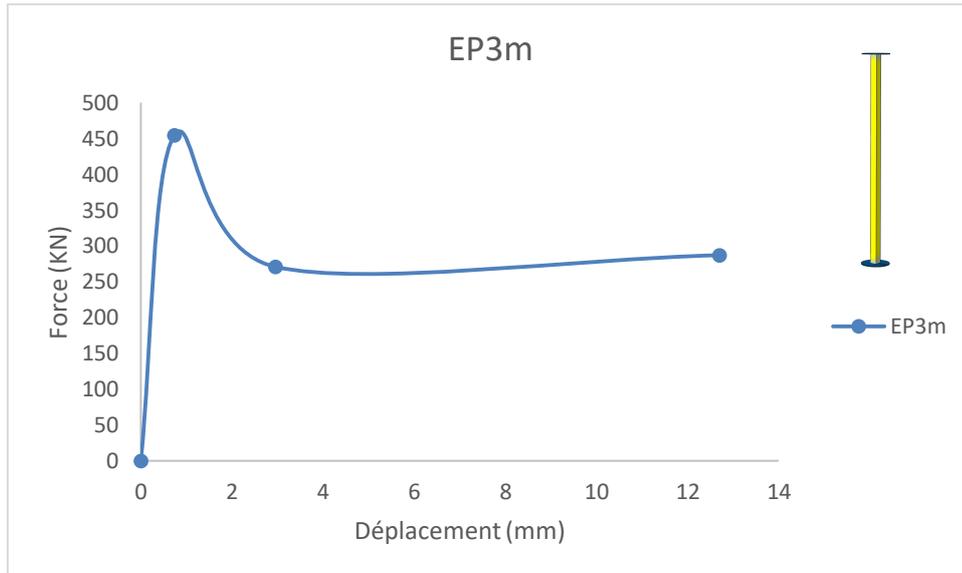
Figure IV.6. Courbe forces – déplacements du poteau PRC-3/2

Comparativement au poteau PRC-1, l'augmentation de la hauteur de la zone centrale confinée par le composite FRP à 1,5m ne modifie pas le mode de flambement du poteau et le déplacement maximal est toujours produit dans la partie non renforcée proche des extrémités, cependant, le comportement devient plus rigide. La charge maximale de 337,45 kN provoque un déplacement de 01mm. A partir de cette charge, le déplacement croit rapidement et la résistance diminue jusqu'à la rupture.

**IV.2.4. Poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP : PRC-3**



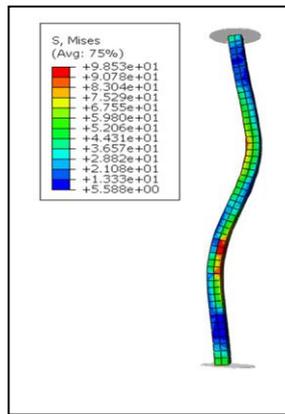
**Figure IV.7.** Cartographie des contraintes, déformations et déplacements : Poteau PRC-3



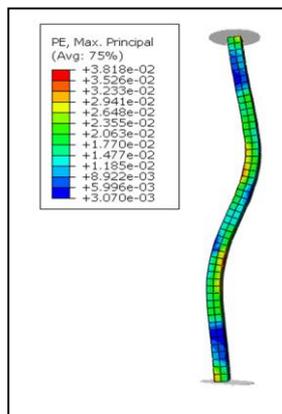
**Figure IV.8.** Courbe forces – déplacements du poteau PRC-3

La figure IV.7 montre que le flambement du poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP : PRC-3 est moins important comparativement aux spécimens précédents PRC-1 et PRC-3/2 et le mode de flambement se rapproche du mode I avec une courbure dans un sens et le déplacement max est donné dans la partie centrale. La figure IV.8 montre que le comportement est linéaire jusqu'à une charge maximale appliquée de 454,97 kN avec un déplacement correspondant de 0,74 mm. Au-delà, de cette valeur de charge, la résistance décroît rapidement jusqu'à 270,96kN avec un déplacement correspondant de 2,95 mm, puis se stabilise sur un palier jusqu'à la rupture. On observe donc une légère amélioration de la résistance comparativement au poteau de référence contrairement aux cas du renforcement partiel de la zone centrale du poteau.

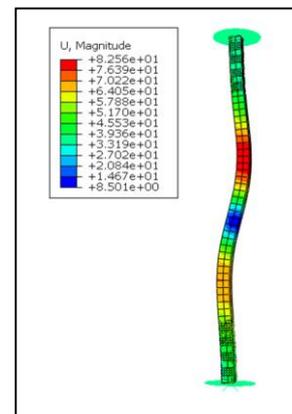
**IV.2.5. Poteau avec un ferrailage classique renforcé avec deux (02) bandes composites GFRP de 0,5 m de longueur respectivement, disposées aux extrémités du poteau. PRC-2B1/2**



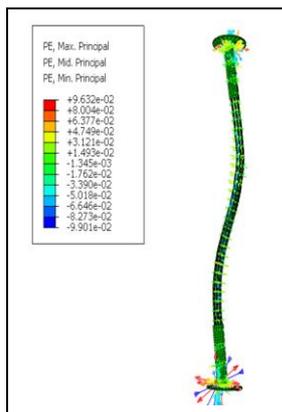
a) Evolution des contraintes dans le poteau



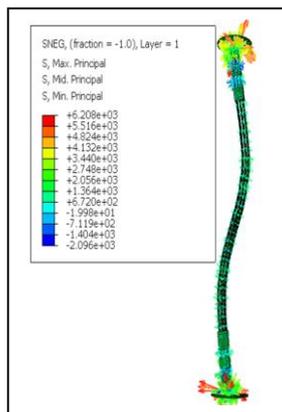
b)- Evolution des déformations dans le poteau



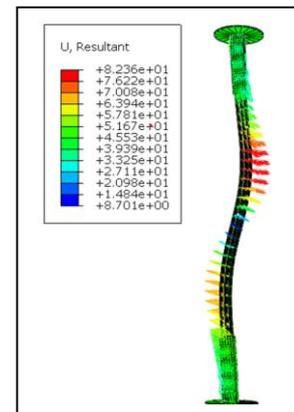
c) Evolution des déplacements dans le poteau



d) Evolution des champs de déformations dans les armatures

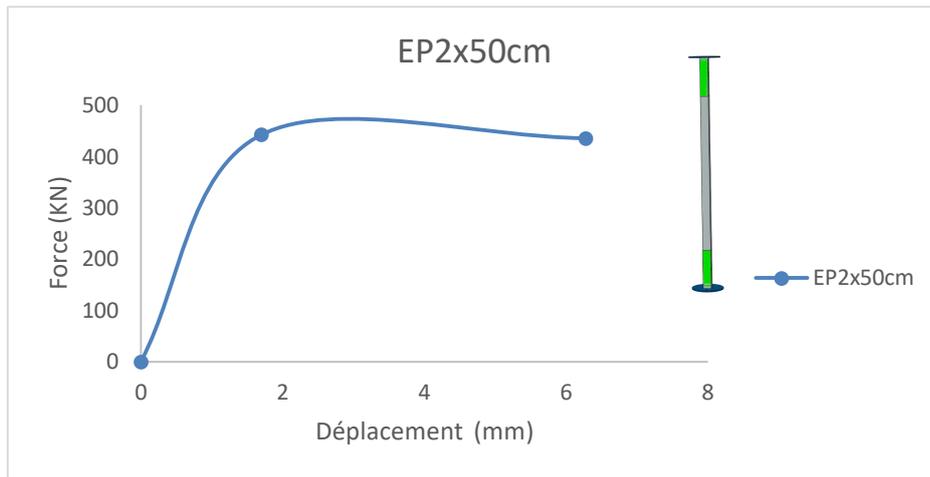


e) Evolution des champs de contraintes dans les armatures



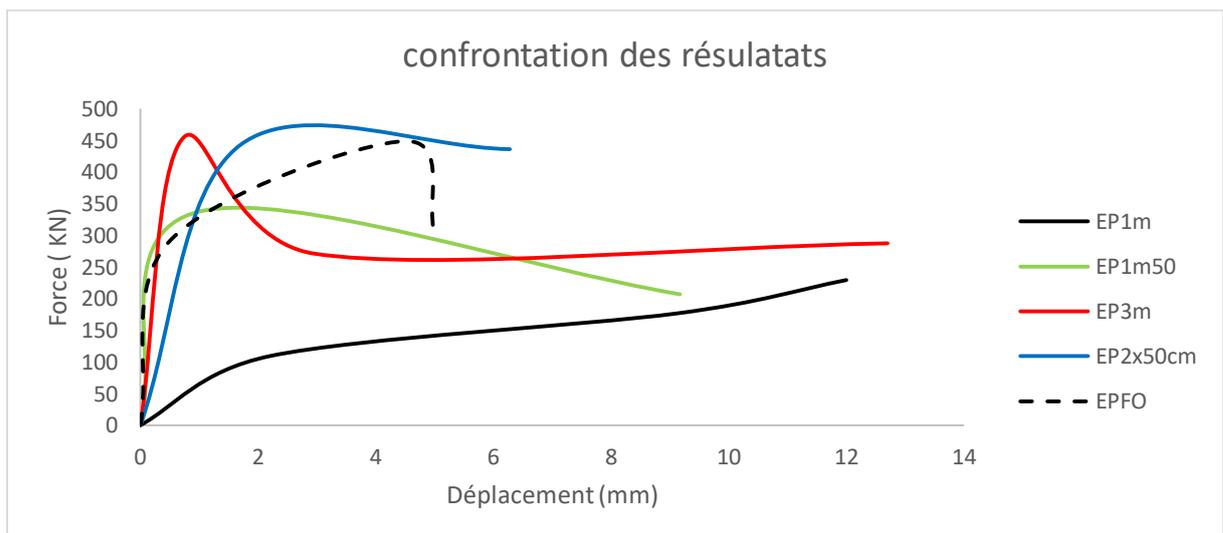
f) Evolution des champs de déplacements dans les armatures

**Figure IV.9.** Cartographie des contraintes, déformations et déplacements : Poteau PRC-2B1/2



**Figure IV.10.** Courbe forces – déplacements du poteau PRC-2B1/2

Le mode de flambement observé est le mode II. Le flambement est plus accentué et les déplacements sont plus importants dans les parties non renforcées proche de la zone centrale du poteau. La charge maximale est de 470 kN avec un déplacement correspondant de 3,2 mm. A partir du pic, la charge se stabilise puis décroît très lentement jusqu’à un déplacement de 6,28 mm correspondant à une charge de 436 kN.



**Figure IV.11.** Confrontation des courbes forces – déplacements des spécimens considérés

La figure IV.11 montre clairement l'influence du renforcement des poteaux en béton armé par les composites sur la résistance au flambement et la ductilité. En effet, le renforcement partiel de la partie centrale diminue la résistance au flambement contrairement au cas du renforcement des parties extrêmes proches des extrémités où la résistance au flambement est améliorée. La confrontation des courbes forces – déplacements des spécimens considérés montre que le cas de renforcement de la partie centrale influe sur le mode de comportement, la rigidité diminue énormément ainsi que la résistance ultime comparativement aux autres variantes qui présentent presque le même comportement surtout dans le domaine élastique, cependant dans le domaine élasto plastique le comportement est très influencé par la technique de renforcement considérée. Le meilleur comportement est obtenu pour le cas du poteau avec un ferrailage classique renforcé avec deux (02) bandes composites GFRP de 0,5 m de longueur respectivement, disposées aux extrémités du poteau. PRC-2B1/2 en termes de résistance et en économie de matériau composite comparativement au poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP : PRC-3.

### **IV.3. Conclusion du chapitre**

Les différents résultats illustrés par les différentes cartographies des contraintes, des déformations et des déplacements, ainsi que les courbes de comportement forces-déplacements mettent en exergue l'influence du renforcement partiel des poteaux en béton armé par des composites GFRP sur le comportement et le mode de rupture. L'influence est surtout visible dans le domaine élasto plastique (domaine non linéaire) où selon le mode de renforcement, on observe soit une augmentation ou une décroissance de la capacité portante et du déplacement correspondant au pic de résistance.

Le renforcement seulement de la partie centrale du poteau entraîne une décroissance de la capacité portante et de la rigidité comparativement aux autres variantes qui présentent presque le même comportement surtout dans le domaine élastique. Il s'avère que le renforcement des deux extrémités du poteau, d'une manière symétrique (poteau. PRC-2B1/2) permet d'augmenter non seulement la résistance mais également d'améliorer la ductilité et surtout d'économiser le matériau composite comparativement au poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP : PRC-3.

En conclusion, le recours au renforcement partiel doit faire l'objet d'une attention particulière, même si le renforcement des deux extrémités du poteau a donné de meilleurs résultats, beaucoup d'études sont nécessaires pour prétendre à la substitution au renforcement total.

---

---

## **CONCLUSION GENERALE**

---

---

## **Conclusion générale**

Ce travail de recherche représente une contribution à l'étude de l'influence du renforcement partiel sur la capacité portante, la ductilité et le mode de flambement des poteaux en béton armé. S'il est admis que le recours aux chemises et enveloppes composites permet d'améliorer les résistances et ductilité des poteaux sous compression, le renforcement partiel juste d'une partie du poteau peut influencer considérablement la résistance et le comportement mécanique, en général.

Les différents résultats obtenus dans cette étude nous ont permis de formuler les conclusions préliminaires suivantes :

- La longueur de flambement est un paramètre influent dans la classification des poteaux courts ou élancés ;
- l'évolution de l'élancement ' $\lambda$ ' en fonction du rayon de giration ' $i$ ' suit une forme non linéaire, lorsque le rayon de giration est important, le poteau résistera mieux au flambement ;
- Le renforcement des colonnes par les matériaux composites augmente la résistance et la ductilité ;
- Le renforcement partiel des poteaux élancés influe sur la résistance ultime selon la zone renforcée du poteau mais ne modifie pas le mode de flambement. Pour les cas étudiés, Le mode de flambement observé est le mode II ;
- le renforcement partiel de la partie centrale diminue la résistance au flambement contrairement au cas du renforcement des parties extrêmes proches des extrémités ou la résistance au flambement est améliorée ;
- le renforcement partiel et symétrique des zones extrêmes du poteau, (poteau. PRC-2B1/2) engendre une augmentation non seulement de la résistance mais également une amélioration de la ductilité et surtout une économie du matériau composite comparativement au poteau avec un ferrailage classique renforcé totalement avec du composite GFRP : PRC-3.

Enfin, même si les résultats numériques obtenus nous renseignent sur le mode de flambement et la capacité portante des poteaux élancés renforcés partiellement par les composites. Beaucoup d'études sont nécessaires pour prétendre à la substitution au

renforcement total. Des investigations expérimentales sont nécessaires et indispensables pour pouvoir se prononcer sur l'efficacité et l'opportunité du renforcement partiel des éléments élancés en béton par les matériaux composites, ce qui permettra de valider les différents résultats numériques obtenus dans ce travail.

En perspectives, il est recommandé :

- de réaliser des études expérimentales afin d'appréhender le comportement réel des poteaux élancés en béton renforcés par les matériaux composites et montrer ainsi l'efficacité du renforcement partiel des zones extrêmes des colonnes en béton ;
- de mener une étude paramétrique plus importante en considérant tous les paramètres qui gouvernent le comportement des poteaux élancés afin d'optimiser le type de renforcement.

---

---

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

---

---

- [1] **CHAALLAL, O**, Structures en béton armé : calcul selon la norme ACNOR A23. 3-04. Puq, 2012.
- [2] **LE NGUYEN, K**, ‘Contribution à la compréhension du comportement des structures renforcées par FRP sous séismes’ Thèse de Doctorat, l’institut national des sciences appliquées de Lyon, 2015.
- [3] **PLEAU, R.**, ‘Comportement et dimensionnement des poteaux’, Automne 2012.
- [4] **BENSELAMA, K**, ‘Détermination des charges critiques de flambement des plaques composites’ Thèse de Doctorat L.M.D, Spécialité : Génie civil, Option : Structures et matériaux, Univ.Sidi Bel Abbas. 2015.
- [5] **COSKUN, SB et ÖZTÜRK, B.**, Analyse de la stabilité élastique des colonnes Euler à l'aide de techniques analytiques approximatives, *Advances in computational Stability Analysis* , 6 (1),2012.
- [6] **LAROZE, S., et BARREAU, J.**, Mécanique des structures. Eyrolles 1988.
- [7] **BENKABA, A.**, ‘Etude du problème du flambement des profils a inertie variable’ Mémoire de Master en génie Civil, Option : Construction métallique Univ. Tlemcen.2013.
- [8] **BECHEUR, A.**,’ coures de structures métalliques.
- [9] **MOHAMED, B.**, ‘Cours Simplifiés : Résistance Des Matériaux’, univ-usto.2019.
- [10] **BENIDIR, R.**,’ Etude de poteaux élancés en béton armé soumis à un chargement excentré’.Mémoire de Master en génie civil,Option :Structures .Univ. Constantine 1.2015.
- [11] **SHANMUGAM, NE et LAKSHMI, B.**,’ Rapport sur l’état de l’art des poteaux composites acier-béton’, *Journal de recherche sur l’acier de construction*, 57 (10), 1041-1080,2001
- [12] **FARAHMANDPOUR, C.**, ‘Modélisation et simulation du comportement des bétons confinés’ Thèse de doctorat, Spécialité : Mécanique-Génie Civil, université Pierre et Marie curie, 2017.
- [13] **BOUAMRA, Y.**, ‘Contribution à l’amélioration de la rigidité flexionnelle des poutres par une nouvelle technique de confinement’ Thèse de Doctorat, Spécialité : Génie Civil, Option : Structures et matériaux, UMMTO 2016
- [14] **MADOUNI, L.**, ‘Simulation numérique des éléments en béton confinés par grilles métalliques’ Mémoire de Master en génie civil, Option : Structures, UMMTO 2011.
- [15] **FODILI, B.**,’ Simulation numérique du comportement thermomécanique du soudage d’un acier HLE pour les tubes soudée en spiral destinées au transport des hydrocarbures’ Mémoire de master en génie des matériaux, Option : Ingénierie des surfaces, école nationale supérieur des mines et métallurgie ENSMM-Annaba, 2016.

- [16] **MAZOUZI, A.**, 'Simulation numérique par élément finis de l'amorçage et la propagation d'une fissure en mode I dans une éprouvette DCB en composite' Mémoire de magister en Génie mécanique USTHB ,2012.
- [17] **FODILI, B.**, ' Méthodes de contrôle qualité, application à la fabrication et à la qualification des tubes soudés en matériaux métallique destinés au transport des hydrocarbures, Mémoire de master en génie des matériaux, Option : Ingénierie des surfaces, école nationale supérieure des mines et métallurgie ensmm-Annaba,2016.
- [18] **SALHI, L.**, 'Simulation avec Abaqus nouvelle disposition de ferrailage dans un voile court' Mémoire de master en génie civil, Option : Structures et matériaux, UMMTO 2013.