

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة سعيدة - د. مولاي الطاهر

UNIVERSITÉ DESAÏDA - Dr. MOULAY TAHAR



Faculté de Technologie

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

**MEMOIRE**

*Présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER en Génie civil*

*Spécialité : Structures*

## **Modélisation Numérique du comportement Linéaire de poutre en béton armé par logiciel ABAQUS**

Présenté par :

**HASSANI Fatima zohra**

**ZIDOUN Khadidja**

Soutenu le 07 /06/ 2023, devant le jury composé de :

M <sup>r</sup> . KACI Hakim	Professeur	Président
M <sup>r</sup> . BENTAHAR Mohammed	Maître de conférences classe A	Encadreur
M <sup>r</sup> . MAHMOUDI Nourredine.	Professeur	Examineur

***Année universitaire 2022/2023***

# Remerciement

*On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et terminer ce mémoire.*

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de M<sup>r</sup> BENTAHAR Mohammed on le remercié pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Des remerciements aux membres du jury pour, l'intérêt et d'avoir accepté de jurer ce travail.*

*Je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé, soit par leurs connaissances dans des domaines précis, soit sous forme de conseils quand je en avais besoin. Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes qui se sont intéressées de près ou de loin au projet.*

# Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, qui ceux qui m'ont **encouragé et soutenu tout au long de mes études,**

**et à mes trois sœurs cadettes,** qui ont changé mon humeur au moment de mon angoisse, et bien sur le premier

**Petits-enfants de la famille Yacine**

et à mes deux frères aînés qui m'ont soutenu dans ce travail, et à ma famille et mes amis proches sans exception surtout ma binôme **ZIDOUN Khadîdja,**

et tous mes amis de la promotion de 2<sup>ième</sup> année master Génie civil spécialité structures.

**HASSANI Fatima**

# Dédicace

Au nom du dieu le clément et le miséricordieux louange à, le tout puissant, le très miséricordieux, pour m'avoir donné la chance et la force nécessaire, pour réaliser cet humble et modeste travail.

Au prophète Mohammad Sallalahou 'AlayhiWasallam  
Que les bénédictions et la paix de Dieu soient sur lui « Apprendre du berceau jusqu'à la tombe » tel était l'une de ces paroles qui nous a donné le goût de l'apprentissage. Nous lui témoignons notre respect et notre gratitude pour ce que tu as fait pour l'humanité.

À mes parents, qui ont été toujours près de moi pour me soutenir et m'encouragé et qui m'ont toujours aidé par leurs prières et leur grand amour. Toutes les dédicaces du monde ne sauraient exprimer l'amour et le respect que je porte pour vous. Que Dieu vous protège et vous garde.

À mes amis qui m'ont toujours encouragés et qui n'ont jamais hésité à me motiver dans mes moments de faiblesse surtout ma binôme Fatima et mon professeur AyharChafiaa .

A mes frères et soeurs, Bouziane, Rachid, Fatima Zahra et Bouchra .vous avez été d'un grand apport pour moi pendant ce long processus, ce travail est aussi le votre

Nous tenons à dédier ce travail à toutes ces personnes qui ont contribué de près ou de loin, par leur soutien moral ou matériel à l'accomplissement de ce projet.

**ZIDOUN Khadidja**

## Symboles et notations

Symboles	unité	Symboles	unité
N: Effort normal	(N)	P, q : Charge concentrée	(N)
V, T : Effort tranchant	(N)	A et B : Réactions d'appuis concentrées	(N)
M : Moment fléchissant	(N.mm)	→: Force horizontale	(N)
F/X : Translation horizontale	(NM)	↑: Force verticale	(N)
F/Y : Translation verticale	(NM)	$\theta$ : Angle de rotation	(degré)
$M_z$ : Rotation	(degré)	M : Masse	(Kg)
W : Poids	(N)	b : Largeur	(cm)
G : Centre de gravite	(cm)	L : Longueur	(cm)
e : Epaisseur	(cm)	E : Module de Young	(MPa)
h : Hauteur	(cm)	S : Surface (mm <sup>2</sup> )	(mm <sup>2</sup> )
$f_r$ : Valeur de flèche de référence	(mm)	y : Distance du point M par rapport à la ligne neutre	(mm)
$f_m$ : Valeur de flèche mesurée	(mm)	W : Charge (N)	(N)
$\delta X$ : L'erreur absolue (l'unité de la grandeur à mesurer)	(cm)	$M_f$ : Moment fléchissant dans la section droite S	(N.mm)
I : Moment d'inercie	(mm <sup>4</sup> )	$\tau$ : Contrainte de cisaillement	(MPa)
$\sigma$ : Contrainte normale	(MPa)	$I_z$ : Moment quadratique de la section droite S par rapport à l'axe (G, z)	(mm <sup>4</sup> )
X : Valeur mesurée de la grandeur	(cm)	Xe : Valeur théorique exacte de la même grandeur.	(cm)
$\epsilon_r$ : l'erreur relatif	(%)	$Y'$ : Dérivée première	(S.U)
S : coefficient de sécurité	(S.U)	$Y''$ : Dérivée seconde	
Re : résistance élastique	(MPa)	$\epsilon$ : Déformation	(mm)
Rpe : résistance pratique à l'extantion	(MPa)	$\Delta x$ :incertitude absolue	(U.G. M)

الملخص:

تعد نمذجة سلوك الحزم ظاهرة مهمة في مجال الهندسة المدنية و دراسة الهياكل. بالإضافة إلى ذلك، كان الهدف من العمل المقدم هو تحديد أكثر دقة لنمذجة السلوك الخطي للضغط و التشوه في عوارض الخرسانة المسلحة، الناتجة عن تطبيق وطاقة ALLSE و طاقة التشوه ALLIE حمولة موحدة. بالإضافة إلى ذلك، تم تقييم الطاقات المختلفة مثل الطاقة الداخلية العمل الخارجي والإزاحة وقوة رد فعل الحزمة الخرسانية المسلحة للسلوك الخطي بواسطة طريقة العناصر المحدودة المكونة من 8 عقدة لنمذجة الحزمة C3D8R لنموذج (ثلاثي الأبعاد). من ناحية أخرى، تم استخدام عناصر (FEM) لنمذجة الجمالونات والتعزيزات. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء T3D2 والألواح، وبالتالي تم استخدام عناصر المحاكاة العددية بواسطة الكود الحاسوبي ABAQUS 16.3.1.

**الكلمات المفتاحية:** العارضة الخرسانية المسلحة، السلوك الخطي ، أباكيس ، الألواح، الجمالون، التعزيز، النمذجة

### Résumé:

La modélisation du comportement des poutres est un phénomène important dans le domaine de la Génie civil et pour l'étude des structures. Par ailleurs, L'objectif du travail présenté était de déterminer plus précisément sur la modélisation du comportement linéaire de la contrainte et de la déformation dans les poutres en béton armé, produites par l'application d'une charge uniforme. En outre, les différentes énergies telles que l'énergie interne ALLIE, l'énergie de déformation ALLSE, l'énergie du travail externe, le déplacement et la réaction force de la poutre en béton armé d'un comportement lainière ont été évaluées par la méthode des éléments finis (FEM) d'un modèle (3D). D'autre part, des éléments C3D8R à 8 nœuds ont été utilisés pour modéliser la poutre et les plaques, ainsi les éléments T3D2 ont été utilisés pour modéliser les treillis et les armatures. De plus, la simulation numérique a été réalisée par le code de calcul ABAQUS 16.3.1.

**Mots clés :** Poutre en béton armé, comportement linéaire , Abaqus , plaque ,treillis, armatures ,modélisation

### Abstract:

**La modélisation du comportement des poutres est un phénomène important dans le domaine du génie civil et pour l'étude des structures. Par ailleurs, l'objectif du travail présenté était de se prononcer plus précisément sur la modélisation du comportement linéaire de la contrainte et de la déformation dans les poutres en béton armé, produites par l'application d'une charge uniforme. Par ailleurs, les différentes énergies telles que l'énergie interne ALLIE, l'énergie de déformation ALLSE, l'énergie de travail extérieur, le déplacement et la force de réaction de la poutre en béton armé de comportement linéaire ont été évaluées par la méthode des éléments finis (FEM) d'un modèle (3D). D'autre part, des éléments C3D8R à 8 nœuds ont été utilisés pour modéliser la poutre et les plaques, ainsi les éléments T3D2 ont été utilisés pour modéliser les fermes et les armatures. De plus, la simulation numérique a été réalisée par le code de calcul ABAQUS 16.3.1.**

**Keywords:** Reinforced concrete beam, linear behavior, Abaqus, plate, truss, reinforcement, modeling

# Table des matières

<b>REMERCIEMENT</b> .....	<b>I</b>
<b>DEDICACE</b> .....	<b>III</b>
<b>SYMBOLES ET NOTATIONS</b> .....	<b>IV</b>
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	<b>VII</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>X</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>XII</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>14</b>
<b>1ASPECTS GÉNÉRAUX SUR LES COMPORTEMENTS DES POUTRES</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1INTRODUCTION</b> .....	<b>16</b>
<b>1.2GÉNÉRALITÉS SUR LES POUTRES</b> .....	<b>16</b>
1.2.1Types de poutres.....	16
1.2.2Définition .....	16
1.2.2.1Poutre simple.....	17
1.2.2.2Poutre console .....	18
1.2.2.3Poutre avec Porte-à-faux .....	18
1.2.2.4Poutre encastrée et supportée .....	19
1.2.2.5Poutre continue.....	19
1.2.2.6Poutre à double encastrement.....	20
1.2.2.7Poutre supportée à double encastrement .....	<b>20</b>
<b>1.3NOTIONS DES CHARGES</b> .....	<b>21</b>
1.3.1Charges permanentes.....	21
1.3.2Charges variables ou d'exploitation.....	21
1.3.3Charges sous forme d'actions indirectes.....	21
1.3.4Charges dynamiques .....	21
Charges exceptionnelles.....	21
1.3.5Charges dues au vent.....	21
<b>1.4NOTION DES APPUIS</b> .....	<b>22</b>
1.4.1Appui simple .....	22
.....	22
1.4.2Appui double (articulation) .....	22
1.4.3Encastrement .....	23
<b>1.5LES THEORIES DES POUTRES</b> .....	<b>23</b>
1.5.1Hypothèses .....	23
1.5.1.1Hypothèse 1 .....	23

1.5.1.2Hypothèse 2.....	24
<b>1.6EFFORTS EXTERIEURS.....</b>	<b>24</b>
1.6.1Définition.....	24
1.6.2Les charges en théorie des poutres .....	24
<b>1.7Les systèmes .....</b>	<b>25</b>
1.7.1Système linéaire .....	25
1.7.2Système non linéaire .....	25
<b>1.8CONCLUSION.....</b>	<b>27</b>
<b>2ASPECTS GENERAUX DES POUTRES EN FLEXION.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1INTRODUCTION.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2POUTRE EN FLEXION SIMPLE .....</b>	<b>29</b>
2.2.1Définitions et hypothèses .....	29
2.2.2Efforts extérieurs .....	30
<b>2.3DIFFERENTS TYPES DE FLEXION .....</b>	<b>31</b>
<b>2.4CONTRAINTE.....</b>	<b>31</b>
2.4.1Flexion plane simple .....	31
2.4.2Contrainte normale : (flexion simple ou flexion pure).....	32
2.4.3Expression de la contrainte normale max pour une section rectangulaire.....	33
2.4.4Contrainte tangentielle en flexion .....	34
<b>2.5EFFORTS INTERIEURS.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6EFFORTS TRANCHANTS.....</b>	<b>35</b>
<b>2.7MOMENTS FLECHISSANT.....</b>	<b>35</b>
<b>2.8DIAGRAMMES DE L EFFORT TRANCHANT T ET LE MOMENT FLECHISSANT MF</b> <b>.....</b>	<b>36</b>
<b>2.9CONDITION DE RESISTANCE EN FLEXION.....</b>	<b>36</b>
<b>2.10DEFORMÉE.....</b>	<b>37</b>
<b>2.11RELATION ENTRE LA FLÈCHE ET LE MOMENT FLECHISSANT .....</b>	<b>38</b>
<b>2.12RELATION CONTRAINTE - MOMENT FLECHISSANT .....</b>	<b>38</b>
<b>2.13VALEURS USUELLES DE LA FLECHE POUR DES POUTRES.....</b>	<b>39</b>
<b>2.14EXEMPLE .....</b>	<b>39</b>
<b>2.15CONCLUSION.....</b>	<b>40</b>
<b>3NOTIONS GÉNÉRALES DE BÉTON ARMÉ .....</b>	<b>43</b>
<b>3.1INTRODUCTION.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX .....</b>	<b>43</b>
3.2.1Le béton.....	43
3.2.2Différents types du béton .....	44

3.2.3L'objectif de l'utilisation du béton armé .....	44
3.2.4Résistance mécanique à la compression $F_{cj}$ .....	45
<b>3.3NOTIONS D'ÉTATS LIMITES .....</b>	<b>46</b>
3.2.1États limites de service (ELS) .....	46
3.2.2États limites ultimes (ELU).....	46
3.2.3Les critères de conception états limites ultimes (ELU).....	47
3.2.4État-limite ultime de résistance .....	47
3.2.5États-limites de service vis-à-vis de la durabilité de la structure.....	50
3.2.6Etat -limite de compression du béton .....	51
3.2.7L'état limite de service d'ouverture des fissures .....	51
<b>3.3LES DIFFÉRENTS TYPES D' ACTIONS ET SOLLICITATIONS .....</b>	<b>52</b>
3.3.1Les actions.....	52
3.3.2Notions des sollicitations.....	53
<b>3.4L'ACIER .....</b>	<b>54</b>
3.4.1Production des aciers pour béton.....	54
3.4.2Normes et documents de définition.....	55
3.4.3Caractéristiques mécaniques de béton armé.....	55
3.4.4Explication du diagramme contrainte - déformation de l'acier.....	55
<b>3.5CONCLUSION.....</b>	<b>56</b>
<b>4MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE COMPORTEMENT DE POUTRE.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1INTRODUCTION.....</b>	<b>58</b>
<b>4.2ASPECTS GÉNÉRALES SUR LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....</b>	<b>58</b>
4.2.1Méthode des éléments finis .....	58
4.2.2Logiciel Abaqus .....	58
4.2.3Description des fichiers d'ABAQUS .....	59
4.2.4Modélisation des éléments .....	59
<b>4.3MODÈLE NUMÉRIQUE.....</b>	<b>59</b>
4.3.1Propriétés des matériaux .....	60
<b>4.4MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....</b>	<b>61</b>
4.4.1Différentes pièces de notre travail.....	61
4.4.2Module Interaction .....	62
4.4.3Conditions aux limites.....	64
4.4.4Maillage.....	65
4.4.5Modélisation Numérique.....	65
<b>4.5RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>65</b>
4.5.1Modélisation de déplacement.....	66

4.5.2Modélisation de la contrainte.....	67
4.5.3Modélisation de déformation.....	67
4.5.4 Modélisation de la réaction de force.....	68
<b>4.6LES VARIABLES.....</b>	<b>69</b>
4.6.1Variation des énergies.....	69
4.6.2Variation du déplacement.....	71
4.6.3Variation de la force (RF).....	72
<b>4.7CONCLUSION.....</b>	<b>72</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>74</b>
<b>Perspectives.....</b>	<b>75</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>77</b>
<b>ANNEXE.....</b>	<b>81</b>

# Liste des figures

Figure I.1 Schéma d'une poutre [3] .....	16
Figure I.2 Différentes formes des sections droites [4] .....	17
Figure I.3 Illustration d'une poutre simple .....	17
Figure I.4 Illustration d'une poutre console .....	18
Figure I.5 Illustration d'une poutre avec Porte-à-faux .....	18
Figure I.6 Illustration d'une poutre encastree et supportee .....	19
Figure I.7 Illustration d'une poutre continue .....	20
Figure I.8 Illustration d'une poutre à double encastrement.....	20
Figure I.9 Illustration d'une poutre à double encastrement.....	20
Figure I.10 Appui simple .....	22
Figure I.11 Appui double.....	23
Figure I.12 Encastrement .....	23
Figure 1.13 Schéma des efforts appliqués à une poutre sur appui [3].....	24
Figure II.1 illustration de fibre neutre de section dS d'une poutre quelconque [24] .....	29
Figure II.2 Modélisation des efforts extérieurs sur une poutre soumise à la flexion simple [12] .....	30
Figure II.3 Schéma d'une poutre positionné sur deux appuis.....	30
Figure II.4 Illustration de différentes fibres d'une poutre en flexion .....	30
Figure II.5 Élément de la poutre .....	31
Figure II.6 Différents types de flexion [29] .....	31
Figure II.7 Zone où les fibres sont tendues [13].....	32
Figure II.8 Zone où les fibres sont comprimées [14] .....	32
Figure II.9 Contraintes normales en flexion [15] .....	33
Figure II.10 Contrainte tangentielle en flexion [17].....	34
Figure II.11 Illustration de l'efforts intérieurs [18].....	35
Figure II.12 Illustration de l'effort tranchant [ 9].....	35
Figure II.13 Illustration du moment fléchissant $M_f$ [ 9] .....	36
Figure II.14 Illustration de la déformée [19] .....	37
Figure II.15 Illustration de la flèche $f(x)$ d'une poutre en flexion[ 20] .....	38
Figure II.16 une poutre fléchi soumis à la flexion simple .....	39
Figure III.1 Illustration de mélange du béton [3].....	43
Figure III.2 Diagramme parabole rectangle du béton.....	48

Figure III.3 Explication du diagramme rectangulaire simplifié du béton .....	49
Figure III.4 Illustration du diagramme déformation limites de la section en béton armé (règle de trois pivots).....	49
Figure III.5 Illustration du diagramme déformation- contraintes de calcul de l'acier.....	50
Figure III.6 Illustration du diagramme expérimental (contraintes – déformations) d'un cas en traction simple et diagramme conventionnel de calcul [9] .....	56
Figure IV.1 Élément de brique à 8 nœuds; (b) schéma de points d'intégration 1x1x1 en éléments hexaédriques .....	59
Figure IV .2 Géométrie du modèle.....	60
Figure IV.3 Différentes parties de notre modèle; a) poutre, b) plaque, c) treilles et d) armatures .....	61
Figure IV.4 L'assemblage des différentes parties du modèle; plaques, treilles et les armatures .....	62
Figure IV.5 Les parties de l'interaction.....	62
Figure IV.6 Différentes régions intégrées.....	63
Figure IV.7 Illustration de l'interaction de contact; a) Master Slave (partie supérieur) et b) Master Slave (partie inférieur).....	64
Figure IV .8 Illustration des différentes conditions aux limites .....	64
Figure IV.9 Modèle FEM (maillage).....	65
Figure IV.10 Modèle numérique FEM .....	66
Figure IV.11 Modélisation de déplacement de différents éléments; a) poutre, b) armature, c) treilles et d) plaque .....	66
Figure IV.12 Modélisation de la contrainte de différents éléments; a) poutre, b) armature, c) treilles et d) plaque .....	67
Figure IV.13 Modélisation de la déformation de différents éléments; a) poutre, b) armature et c) treilles.....	68
Figure IV .14 Modélisation de la réaction de force de différents éléments; a) poutre, b) armature, c) treilles et d) plaque .....	68
Figure . IV 15 Modélisation de la réaction de force du modèle assemblé.....	69
Figure IV .16 Variation de l'énergie en fonction du temps; a) travail externe, b) l'énergie interne et c) l'énergie de déformation .....	70
Figure IV.17 Déplacement spatial U2 : Poutre Nœud 497 dans NSET Flèche .....	71
Figure IV.18 La variation de la force en fonction du temps.....	72

## Liste des tableaux

Tableau III.1 Les différentes Valeurs usuelles de la flèche .....	39
Tableau III.1 Différentes valeurs de la résistance du béton à la compression [3] .....	45
Tableau III.2 Résistances du béton à la traction. [3] .....	45
Tableau III.3 Explication les deux coefficients ( $\gamma_b$ et $\theta$ ) .....	48
Tableau III.4 Caractéristique mécanique de béton armé [9] .....	55
Tableau IV.1 Les deux fichiers nécessaires d'Abaqus .....	59
Tableau IV.2 Caractéristiques des matériaux .....	60

***INTRODUCTION  
GÉNÉRALE***



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le domaine du génie civil évolue constamment grâce à l'avancée technologique, offrant de nouvelles méthodes de conception, d'analyse et de modélisation de la structure. L'une de ces méthodes est la modélisation numérique, qui permet de prédire le comportement des structures en utilisant des outils logiciels spécialisés, dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous intéressons spécifiquement à la modélisation numérique du comportement linéaire d'une poutre en béton armé à la flexion simple en utilisant le logiciel Abaqus.

L'objectif principal de ce projet de fin d'études est de développer un modèle numérique pour étudier le comportement linéaire d'une poutre en béton armé. En utilisant Abaqus, nous pourrions analyser différents paramètres tels que la charge, la déformation, la contrainte et la force; afin de mieux comprendre son comportement.

Ce mémoire comprend 04 chapitres il est organisé comme suite :

Le premier chapitre présente les aspects généraux sur les comportements linéaires des poutres

Le deuxième chapitre porte sur l'étude générale sur les comportements des poutres en flexion

Ainsi, les efforts extérieurs et intérieurs, contrainte normale, contrainte tangentielle en flexion, efforts tranchants, moments fléchissant, condition de résistance en flexion, déformée, la relation entre la flèche et le moment fléchissant, la flèche les valeurs usuelles de la flèche pour des poutres sont également présentées.

Le troisième chapitre consacre aux notions générales concernant le béton armé et leur caractéristique mécanique, catégories de béton ...

Le quatrième chapitre basé sur la modélisation numérique concernant notre modèle. Ainsi, les différents résultats obtenus avec leurs discussions sont également détaillés. Notant que l'étude de cette modélisation est faite par logiciel ABAQUS.

# *Chapitre*

## *01*



## INTRODUCTION

Une poutre est engendrée par une section droite plane dont le centre appartient à une courbe (C) appelée ligne moyenne du solide. La théorie des milieux curvilignes élastiques adopte l'hypothèse selon laquelle la poutre peut-être modélisée par la courbe (C). L'ensemble des efforts appliqués sur la surface est reporté sur la ligne moyenne. Le calcul en est ainsi simplifié.

### 1.1 GENERALITES DES POUTRES

Les poutres sont des pièces principalement sollicitées en flexion. Les pièces fléchies sont parmi les éléments les plus couramment utilisés en construction béton armé. On les trouve dans tous les types de structures, ou elles constituent des éléments porteurs principaux (traverses de cadre, poutre de toiture ou de plancher....) ou secondaires (pannes. Lisse). [1]

#### 1.1.1 Types de poutres :

#### 1.1.2 Définition :

Structure porteuse horizontale, en bois ou en béton armé, destiné à supporter des charges entre et au-delà des points d'appui.

Il reçoit en général des charge verticales qu'il transmet sur ses appuis. [2]

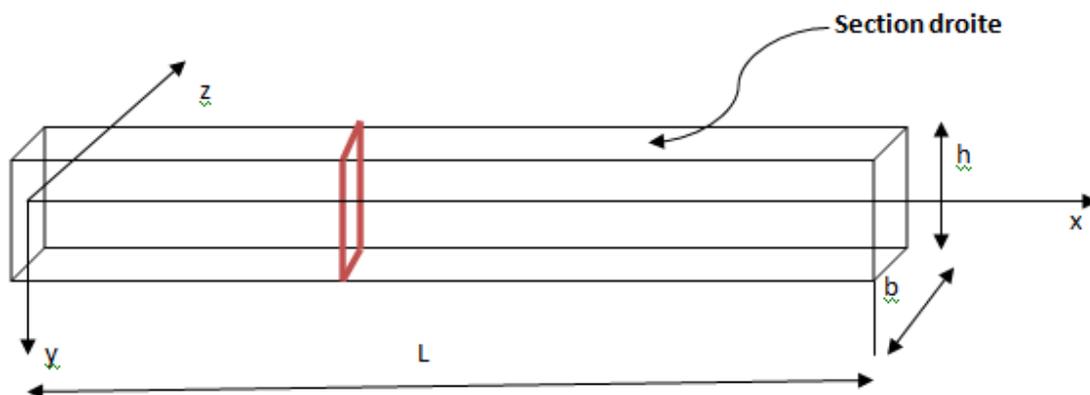


Figure I.1 Schéma d'une poutre [3]

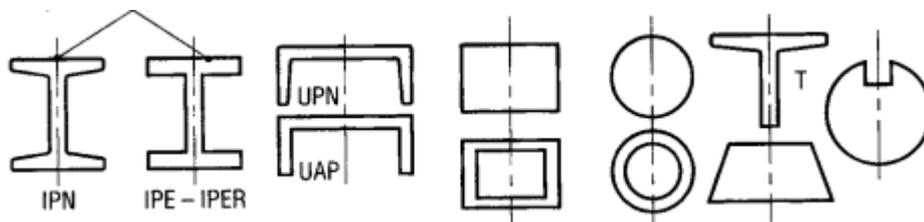
$L$  : longueur,

$h, b$  : dimensions de la section.

## CHAPITRE 1 :ASPECTS GÉNÉRAUX SUR LES COMPORTEMENTS DES POUTRES

Dans les schémas de calcul, la poutre est représentée par son axe, qui est par convention l'axe 'x'. La section est l'intersection de la poutre avec un plan perpendiculaire à son axe. Celle-ci peut avoir plusieurs formes. [3]

### Plan de symétrie et plans des charges



Exemples de poutres ne satisfaisant pas l'hypothèse de symétrie :

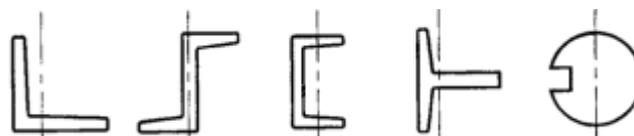


Figure I.2 Différentes formes des sections droites [4]

### 1.1.2.1 Poutre simple :

C'est une poutre reposante sur deux appuis;

- 1- l'appui double,
- 2- l'appui simple.

Les points d'appui sont articulés de façon à ce que les extrémités puissent se mouvoir

Librement pendant la flexion. La figure I.3 montre une poutre simple. [3]

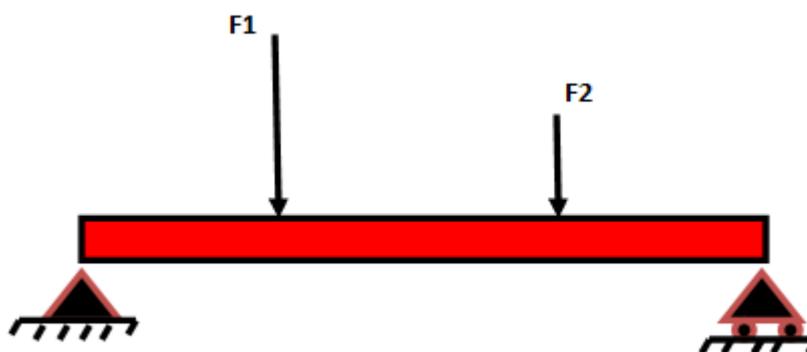


Figure I.3 Illustration d'une poutre simple

### 1.1.2.2 Poutre console :

C'est une poutre encastrée dans un mur à une l'extrémité. L'extrémité encastrée ne bouge pas pendant la flexion, tandis que l'autre extrémité est entièrement libre. [4]

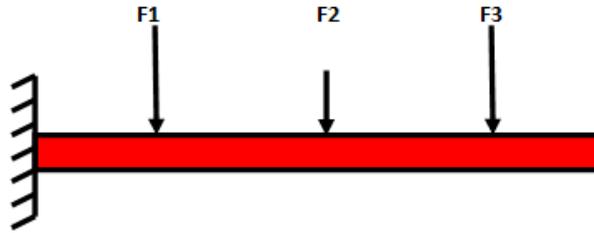


Figure I.4 Illustration d'une poutre console

1.1.2.3 Poutre avec Porte-à-faux :

Poutre dont une extrémité n'est pas supportée et dont l'autre est maintenue soit par encastrement dans une pièce massive, soit par le fait qu'elle est continue au-delà de ce support. [5]

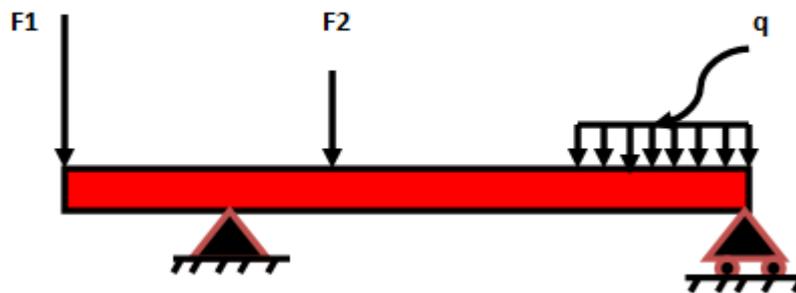
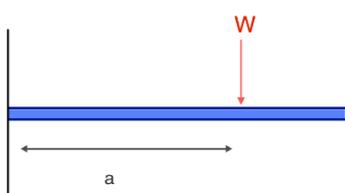
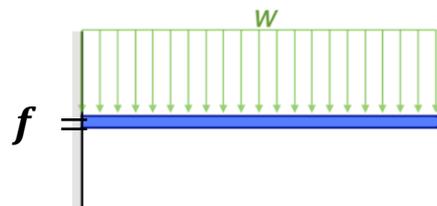


Figure I.5 Illustration d'une poutre avec Porte-à-faux

Des Exemples d'équations de poutre en porte-à-faux peuvent être calculés à partir de la formule suivante, où:



$$f = \frac{wa^2}{6EI} (3l - a)$$



$$f = \frac{wL^4}{8EI}$$



$$f = \frac{wL^3}{3EI}$$

- $f$ : fleche
- $w$ : charge
- $L$  : longueur du member
- $E$  : module de Young
- $I$  : le moment d'inertie du faisceau

### 1.1.2.4 Poutre encastrée et supportée :

Est une poutre qui est fixée à une extrémité (encastrée) et supportée à l'autre extrémité. La fixation encastrée empêche les mouvements de rotation et de translation à cette extrémité, tandis que le support à l'autre extrémité permet des mouvements verticaux, mais pas de rotation. [6]

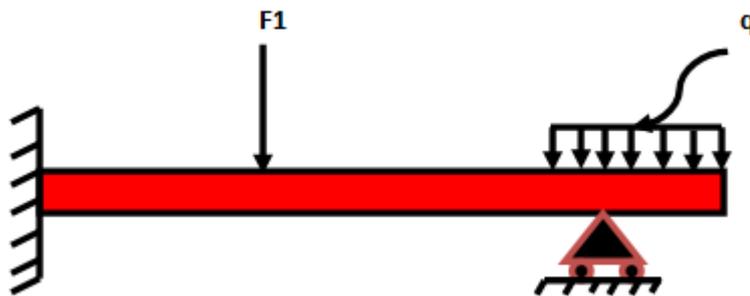


Figure I.6 Illustration d'une poutre encastrée et supportée

### 1.1.2.5 Poutre continue :

C'est une poutre droite horizontale, reposant sur plus de deux appuis simples, sans encastrement. [7].

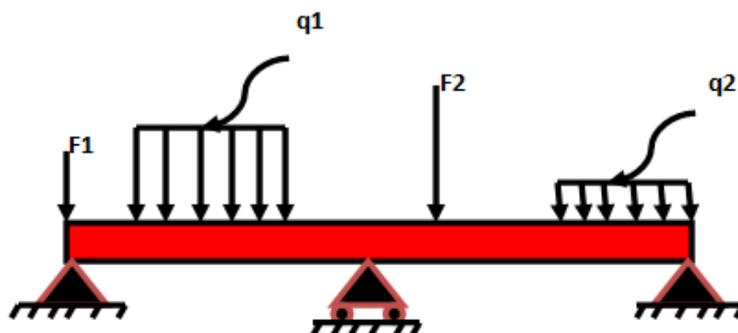


Figure I.7 Illustration d'une poutre continue

### 1.1.2.6 Poutre à double encastrement :

Est une poutre qui fixée aux deux extrémités (encastrement).les fixation encastrées empêchent les mouvements de rotation et de translation à chaque extrémité. [8]

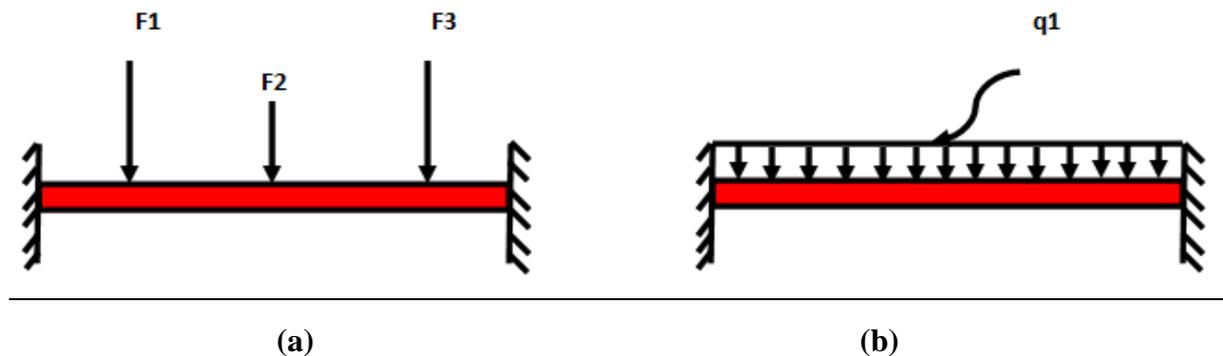


Figure I.8 Illustration d'une poutre à double encastrement

### 1.1.2.7 Poutre supportée à double encastrement :

Est une poutre qui repose sur des appuis à chaque extrémité, mais est fixée à un support intermédiaire entre les deux extrémités (encastrement). [9]

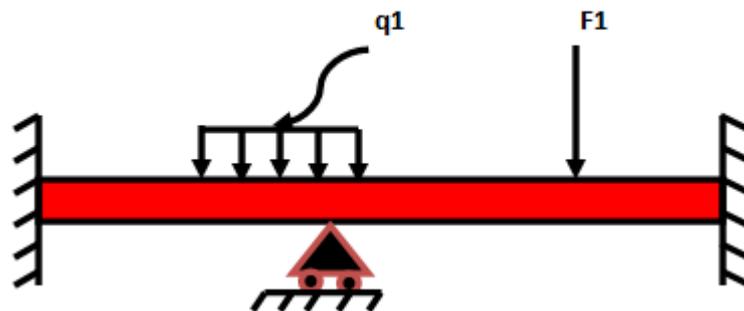


Figure I.9 Illustration d'une poutre à double encastrement supportée

## 1.2 NOTION DES CHARGES :

On appelle charge, toute action sollicitant une structure, généralement représentée sous forme d'une force. On cite les types de charges suivantes:

### **1.2.1 Charges permanentes :**

La charge permanentes comprend non seulement le pond propre des éléments porteurs ,mais aussi les poids des éléments incorporés aux élément porteurs tels que :plafond ,sol ,enduits et revêtements quelconques ainsi que ceux des éléments de la construction soutenus ou supportés par les éléments porteurs tels que : cloisons fixes ,conduits de fumée ,gaines de ventilation ,etc..[10]

### **1.2.2 Charges variables ou d'exploitation:**

Ces charges sont dites aussi charges utiles ou vives, Elles regroupent l'ensemble des actions qui peuvent envahir la construction en fonction de sa destination, telles que meubles personnes, machines etc.... [3]

### **1.2.3 Charges sous forme d'actions indirectes :**

Ce sont les charges qui ne peuvent se concrétiser sous forme de forces mais font néanmoins naître des efforts internes dans une structure. Parmi ces charges on cite les tassements différentiels, les dilatations et contractions forcées causées par des gradients thermiques, retrait ou fluage des matériaux, frottement des appareils d'appui etc. [11]

### **1.2.4 Charges dynamiques :**

Sont des forces variables qui agissent sur une structure pendant un certain laps de temps. Elles peuvent être de nature périodique, impulsive ou aléatoire, et sont généralement liées à des activités ou à des événements spécifiques tels que la circulation de véhicules, les charges sismiques, les charges de vent fluctuantes, les mouvements des machines , les impacts , etc.[12]

### **Charges exceptionnelles :**

Sont des charges qui dépassent généralement les charges de conception normales et peuvent survenir de manière imprévisible ou rare. Elles peuvent être dues à des événements tel que des accidents, des catastrophes naturelles, des impacts, etc. [13]

### **1.2.5 Charges dues au vent :**

Sont les forces exercées par le vent sur une structure. Ces forces peuvent varier en fonction de la vitesse du vent, de la direction, de l'obstruction du bâtiment, de la topographie, etc. [14]

## **1.3 NOTION DES APPUIS :**

Partie d'une construction ou élément recevant les efforts transmis par éléments de structure. En termes de mécanique, on distingue différents types d'appuis, par exemple appui simple, appui double, encastrement.

### 1.3.1 Appui simple :

Cet appui est également appelé appui glissant, appui à rouleau. Sa représentation graphique schématique peut varier mais il est plus commode d'utiliser la présentation de triangle avec un rouleau. C'est le premier type d'appui le plus simple, le plus économique. Il représente une situation idéalisée car dans la réalité il y a très souvent des frottements qui limitent le mouvement dans la direction horizontale. [15]

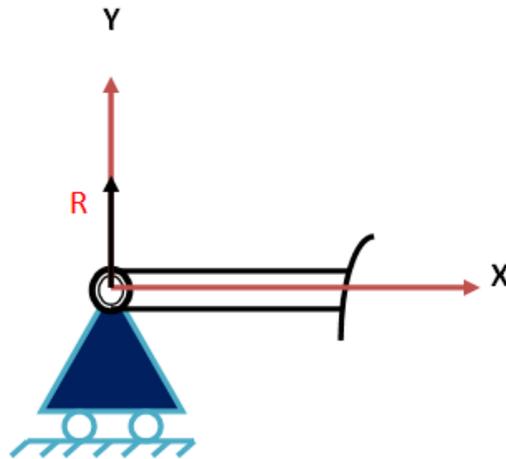


Figure I.10 Appui simple

### 1.3.2 Appui double (articulation):

Cette liaison est très fréquente. Elle peut correspondre à la liaison de la poutre avec un roulement à une rangée de billes muni de ses arrêts axiaux (éventuellement elle est susceptible de représenter aussi un appui simple).

L'articulation introduit 2 inconnues, par projection sur deux directions du plan moyen. [16]

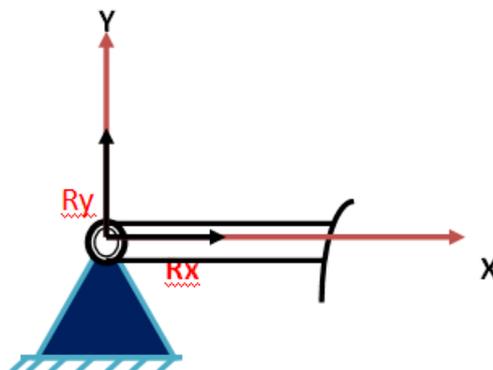


Figure I.11 Appui double

### 1.3.3 Encastrement :

où sont possibles trois composantes de réactions : la réaction verticale  $V_A$  ; horizontale  $H_A$  et le moment d'appui ou moment d'encastrement  $M_A$ .

On suppose que tous les moments et réactions sont appliquées au point A, considéré comme le centre de gravité de la section d'appui. [17]

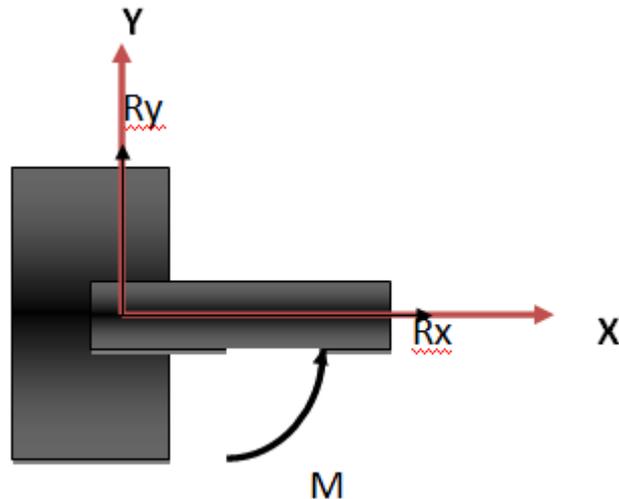


Figure I.12 Encastrement

## 1.4 LES THEORIES DES POUTRES :

La théorie des poutres est un modèle utilisé dans le domaine de la résistance des matériaux. On utilise deux modèles :

- La théorie d'**Euler-Bernoulli**, qui néglige l'influence du cisaillement ;
- La théorie de **Timoshenko** qui prend en compte l'effet du cisaillement. [18]

### 1.4.1 Hypothèses :

#### 1.4.1.1 Hypothèse 1 :

Les sections droites avant déformation restent droites après déformation (pas de gauchissement).

#### 1.4.1.2 Hypothèse 2 :

- **Bernoulli** : La normale à une section avant déformation reste normale après déformation.

Poutres minces (poutres élancées).

- **Timoshenko** : La normale à une section avant déformation ne reste plus normale à cette section (mais elle reste droite). Poutre d'épaisseur modérée [19].

## 1.5 EFFORTS EXTERIEURS :

### 1.5.1 Définition :

Les efforts extérieurs sont les efforts s'exerçant sur la poutre isolée. On en distingue deux sortes :  
-les charges, qui sont des efforts auxquels la poutre est destinée à résister ;  
- les actions de liaison qui sont des efforts appliqués sur la poutre par les liaisons qui la maintiennent en place. [3]

### 1.5.2 Les charges en théorie des poutres

On distingue généralement deux types de charges voir la figure 1.13 (a et b).

- les charges concentrées (ou ponctuelles  $F$ ) qui s'appliquent en un point de la poutre.
- les charges réparties ( $p$ ) qui sont distribuées continûment le long d'un segment de la poutre. [3]

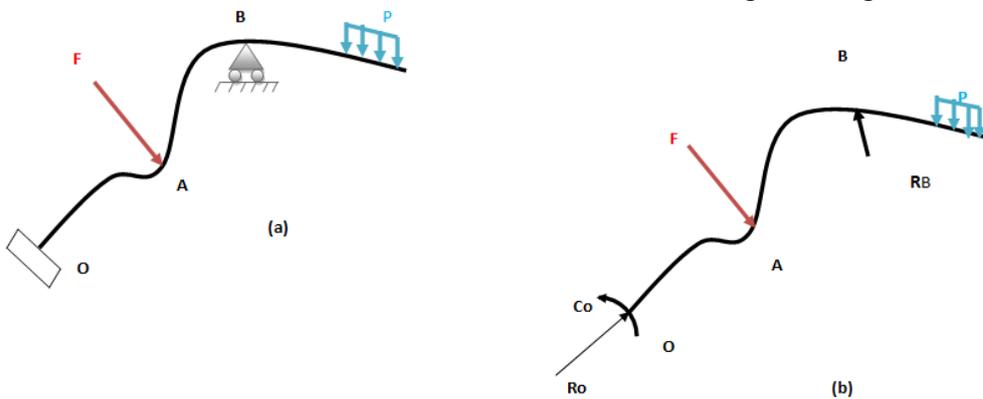


Figure I.13 Schéma des efforts appliqués à une poutre sur appui [3]

## 1.6 Les systèmes :

### 1.6.1 Système linéaire :

Un système linéaire (le terme système étant pris au sens de l'automatique, linéaire (à savoir un système dynamique) est un objet de monde matériel qui peut être décrit par des équations linéaire différentielles ou à la différence), ou encore qui obéit au principe de superposition : toute combinaison linéaire des variables de ce système est encore une variable de ce système. [20]

### 1.6.2 Système non linéaire:

Un système est non linéaire s'il ne vérifie pas le principe de superposition. Les conditions de proportionnalité et d'additivité ne s'appliquent plus aux systèmes non linéaires. Lors de l'étude des systèmes non linéaires on se heurte à plusieurs difficultés:

- L'analyse par des fonctions de transfert est impossible,

## **CHAPITRE 1 :ASPECTS GÉNÉRAUX SUR LES COMPORTEMENTS DES POUTRES**

---

-La notion des pôles disparaît,

-Un système non linéaire possède en général plusieurs points d'équilibre et l'étude de leur stabilité est plus complexe que dans le cas linéaire pour lequel le concept de stabilité est global. La non linéarité d'un système peut être intrinsèque ou peut être isolée, c'est-à-dire que l'on peut avoir une association d'éléments à caractéristiques non linéaires à un système linéaire. Comme pour les systèmes linéaires, il est possible de distinguer, aussi les modèles non linéaires par les caractères suivants :

-A temps continu / A temps discret,

-Invariants dans le temps / Variant dans le temps,

-Mono variables / Multi variables,

-Déterministes / Stochastiques. [20]

### **Conclusion :**

Les différentes notions nécessaires sur les comportements des poutres ont été étudiées dans ce chapitre, tels que les différents types de poutre, notions des charges, notions des appuis, les efforts extérieurs et les théories des poutres.

# *Chapitre*

*02*



## 2 ASPECTS GENERAUX DES POUTRES EN FLEXION

### 2.1INTRODUCTION

Considéronsunepoutrereposantsurdeuxappuisoumiseàunechargeconcentréeverticale.

Après déformation, cette poutre accuse une flèche (déplacement vertical des différents points, d'où le nom de flexion) et on constate que les fibres situées en partie supérieure sont sollicitées en compression tandis que celles qui sont situées en partie inférieure sont sollicitées en traction.

### 2.2 POUTRE EN FLEXION SIMPLE :

#### 2.2.1 Définitions et hypothèses :

La flexion est la déformation d'un objet qui se traduit par une courbure. Dans le cas d'une poutre, elle tend à rapprocher les deux extrémités de la poutre.

En théories des poutres, on considère des fibres, c'est-à-dire des petits cylindres de matières générés par une portion  $dS$  et une courbe parallèle à la courbe moyenne (la « direction de la poutre ») ; la courbe moyenne passe par les centres de gravité des sections droites (sections perpendiculaires à la courbe moyenne). La fibre générée par la courbe moyenne est appelée « fibre neutre ». Elle garde sa longueur lors de la flexion. [12]

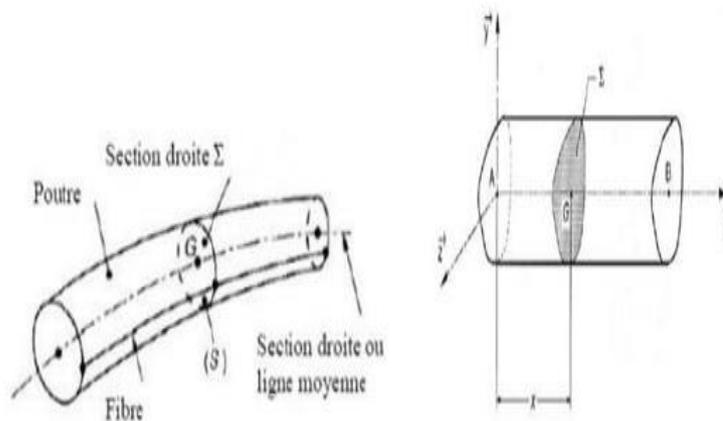


Figure II.1 Fibre neutre de section  $dS$  d'une poutre quelconque [21]

Une poutre est sollicitée en flexion simple quand toutes les forces appliquées à la poutre que ce soient les forces à distance ou les forces élémentaires de liaison sont perpendiculaires à la ligne

moyenne, et soit situées dans le plan de symétrie, soit réparties symétriquement par rapport à celui-ci, ou concentrées en un point ou réparties suivant une loi.

### 2.2.2 Efforts extérieurs

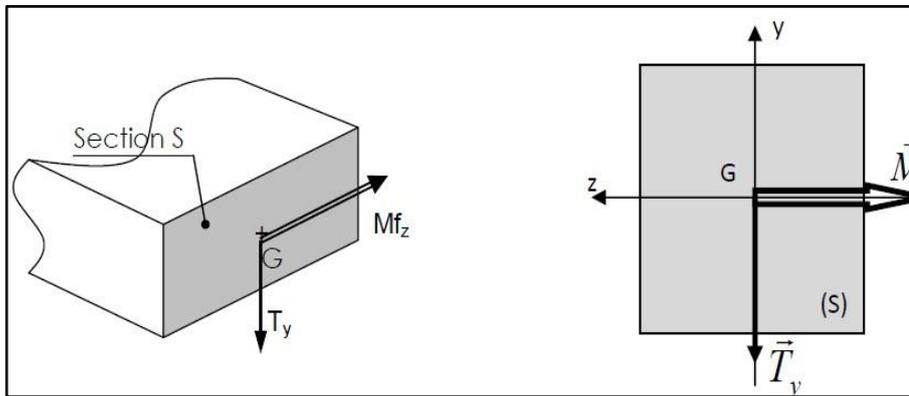


Figure II.2 Modélisation des efforts extérieurs sur une poutre soumise à la flexion simple [22]

Au cours de la déformation, les sections droites (**constantes**) restent planes et normales à la ligne moyenne.

La ligne moyenne de la poutre est rectiligne et confondue avec l'axe  $(\mathbf{o}, \mathbf{x})$

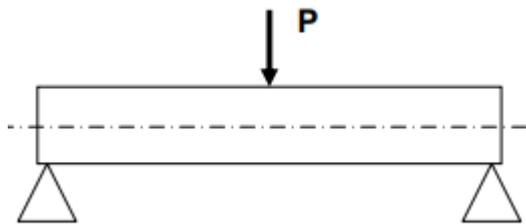


Figure II.3 Schéma d'une poutre positionnée sur deux appuis

Après déformation, cette poutre accuse une flèche et on constate que les fibres situées en partie supérieure sont sollicitées en compression tandis que les fibres situées en partie inférieure sont sollicitées en traction. Entre ces deux régions, il existe une fibre ni tendue ni comprimée ; c'est la fibre neutre.

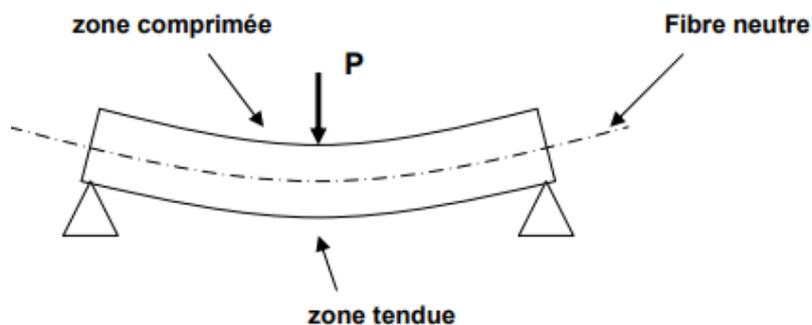


Figure II.4 Illustration de différentes fibres d'une poutre en flexion

La figure ci-dessous représente un élément de cette poutre fléchie. Il est soumis à un moment

fléchissant  $Mf(x)$  et à un effort tranchant  $V(x)$  à l'abscisse  $x$ .

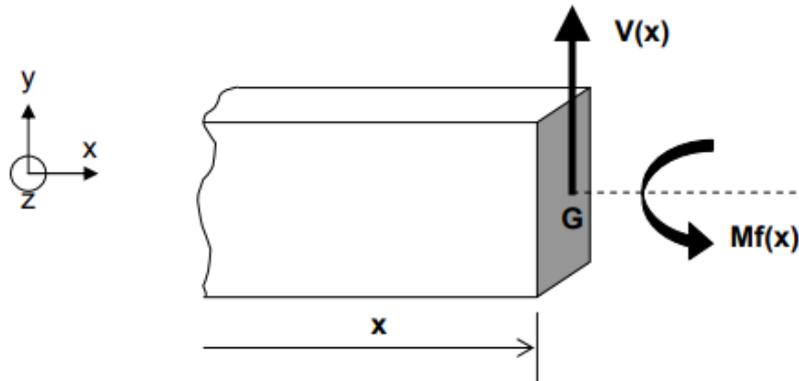


Figure II.5 un élément de la poutre

Remarque importante : bien que  $V(x)$  n'intervienne pas dans le dimensionnement à la contrainte normale, lorsque :

- $V(x) \neq 0$  on a de la flexion simple ;
- $V(x) = 0$  on a de la flexion pure.

### 2.3 DIFFERENTS TYPES DE FLEXION :

Une poutre est soumise à une sollicitation de flexion chaque fois qu'il y a fléchissement de la ligne moyenne, Une poutre est sollicitée en flexion chaque fois que sa ligne moyenne fléchit. On peut distinguer trois types de flexion:

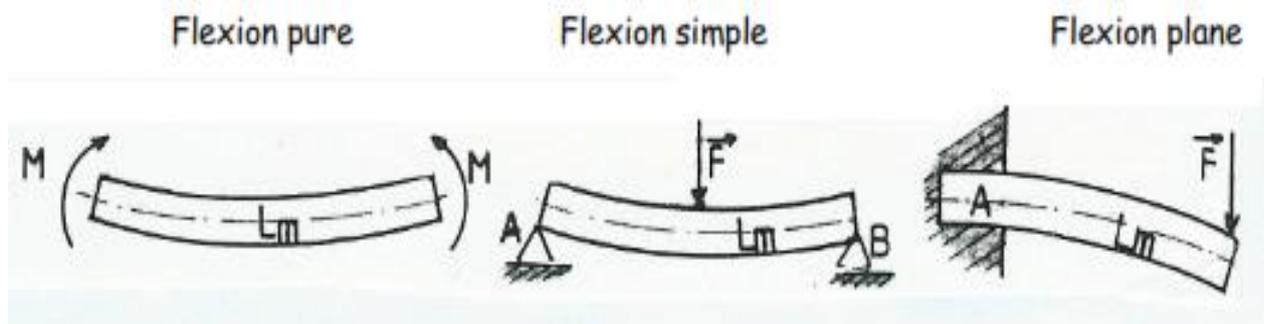


Figure II.6 Différents types de flexion [23]

**Introduction expérimentale** : considérons une poutre reposant sur deux appuis soumise à une charge concentrée verticale.

2.4 CONTRAINTES:

2.4.1 Flexion plane simple

Dans le cas de la flexion plane simple, les contraintes se réduisent essentiellement à des contraintes normales  $\sigma$ . Les contraintes de cisaillement  $\tau$  sont négligeables. [24].

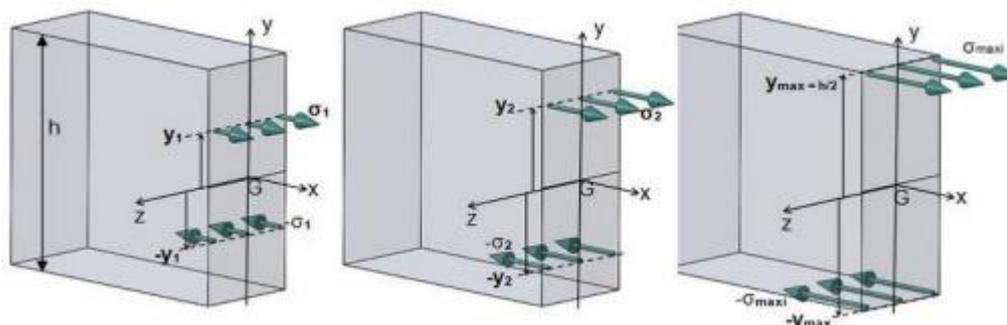


Figure II.7 Zone où les fibres sont tendues [23]

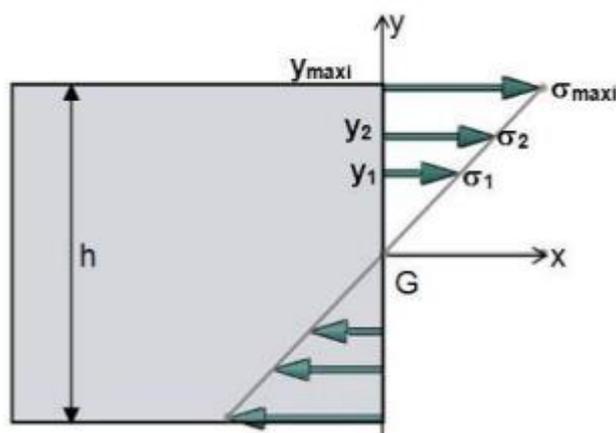


Figure II.8 Zone où les fibres sont comprimées [24]

La contrainte normale  $\sigma_1$  en un point d'une section droite est proportionnelle à la distance  $y_1$  entre ce point et le plan moyen passant par **G**.

$$\sigma = + \frac{M_f \cdot Y}{I_z} \quad \text{(II.1)}$$

avec :

**I**: le moment quadratique calculé par rapport à l'axe qui passe par le centre de gravité de la section, perpendiculairement au chargement.

**M<sub>f</sub>(x)** : La valeur maxi du moment fléchissant dans la section étudiée.

**y** : Variable représentant la cote algébrique entre la fibre neutre et les fibres extrêmes (supérieure et inférieure) de la section.

En flexion simple, lorsque la section est symétrique, la fibre neutre passe par le centre de gravité.

Ainsi,  $y$  variera toujours de la valeur de  $-h/2$  à la valeur de  $+h/2$ .

### 2.4.2 Contrainte normale : (flexion simple ou flexion pure)

Les contraintes normales résultent du moment fléchissant  $M_f$  (les efforts tranchants n'ont aucun effet sur leur valeur). Dans le cas de flexion pure ( $M_f \neq 0$  et  $T = 0$ ), les poutres se déforment suivant des arcs de cercles.

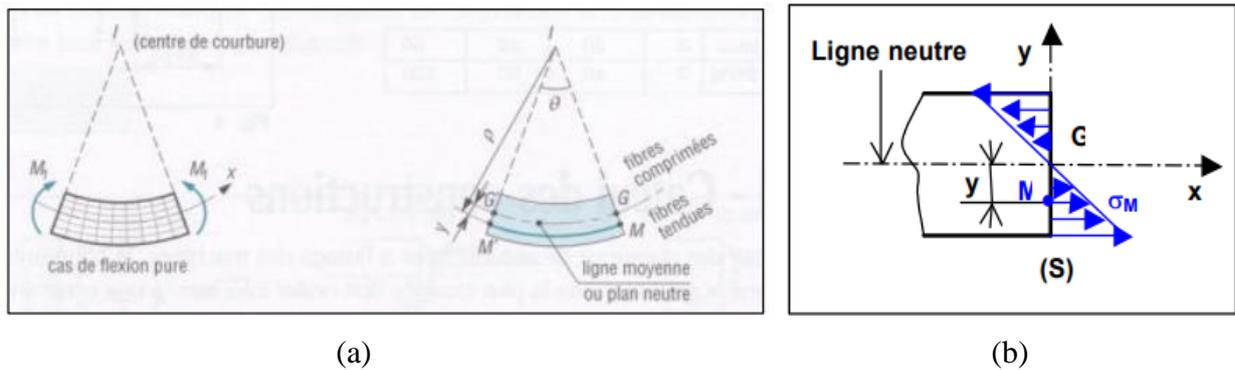


Figure II.9 Contraintes normales en flexion [25]

La ligne moyenne  $GG'$  figure II. 9(b) ne subit ni allongement ni raccourcissement (contraintes nulles). Pour la figure proposée, les fibres situées au-dessus de la ligne neutre sont comprimées et supportent des contraintes de compression ; celles situées au-dessous ( $MM'$ ) sont tendues et supportent des contraintes de traction.

En exprimant l'allongement de la fibre ( $MM'$ ), en utilisant la loi de Hooke ( $\sigma = E \epsilon$ ) et en faisant intervenir le moment fléchissant  $M_f$ , on montre la relation suivante :

$$\sigma_M = \frac{M_f \cdot y}{I_z} \quad (II.2)$$

avec :

$\sigma_M$ : la contrainte normale en  $M$  (en  $MPa$ )

$M_f$ : le moment fléchissant dans la section droite  $S$  (en  $N \cdot mm$ )

$y$ : la distance du point  $M$  par rapport à la ligne neutre (en  $mm$ )

$I_z$ : le moment quadratique de la section droite  $S$  par rapport à l'axe ( $G, z$ ) (en  $mm^4$ )

2.4.3 Expression de la contrainte normale max pour une section rectangulaire :

$$\sigma_M = \left| \frac{6 \times M_{f \max}}{b \times h^2} \right| \quad (\text{II.3})$$

Expression de la contrainte normale max pour un profilé métallique quelconque :

$$\sigma_M = \left| \frac{M_{f \max}}{I / V} \right| \quad (\text{II.4})$$

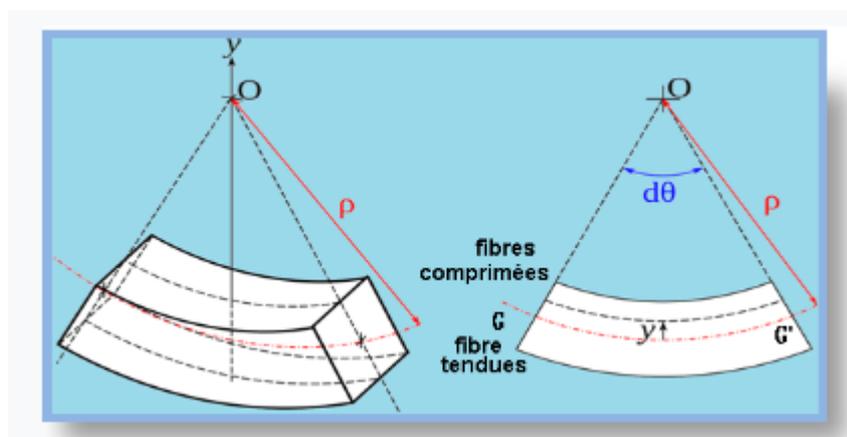
$$|Y| = V \quad (\text{II.5})$$

$I/V$  : (module d'inertie) est toujours donné dans le tableau de caractéristiques de calcul des profilés métalliques (dans ces tableaux, le module d'inertie est aussi noté **Wel**). [26].

2.4.4 Contrainte tangentielle en flexion :

Dans le cas d'une flexion simple ou plane, en plus des contraintes normales, des contraintes Tangentielles apparaissent aussi au niveau des sections droites la contrainte tangentielle moyenne s'explique selon [17]:

$$\sigma_{moy} = \frac{M_{f \max}}{I_z} \times y \quad \text{Ou bien} \quad \tau = \frac{T S / x}{I_{xx'} \cdot b} \quad (\text{II.6})$$



FigureII.10 Contrainte tangentielle en flexion [27]

Dans une poutre sollicitée en flexion plane simple la contrainte tangentielle moyenne s'exprime sous la forme suivante:

$$\tau_{moy} = \frac{T_y}{S} \tag{II.7}$$

Avec :

$\tau_{moy}$  [MPa] ou [daN/mm<sup>2</sup>] : contrainte tangentielle moyenne.

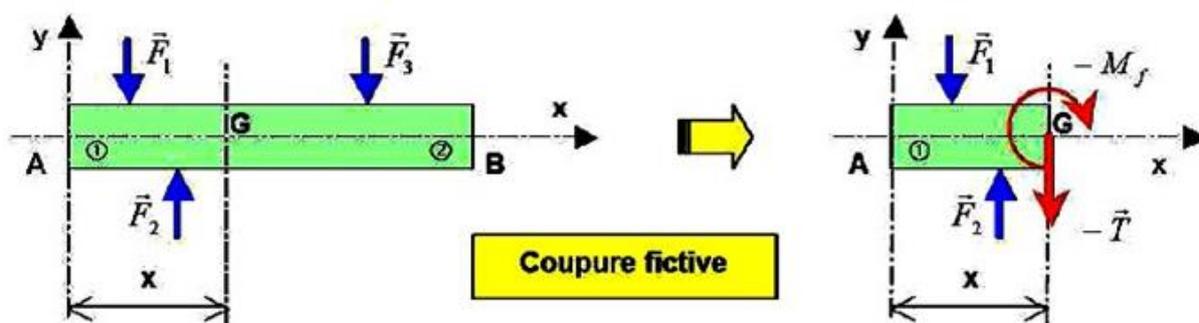
$T_y$ : effort tranchant.

$S$  [mm<sup>2</sup>] : moment statique.

### 2.5 EFFORTS INTERIEURS

Dans le cas de la flexion, les efforts intérieurs dans n'importe quelle section droite se réduisent à un effort tranchant  $T$  (perpendiculaire à la ligne moyenne) et à un moment fléchissant  $M_f$  (perpendiculaire à la ligne moyenne et à  $T$ ).

Pour faire apparaître les efforts intérieurs, on effectue une coupure fictive à la distance ( $x$ ) de l'origine (A). En isolant le tronçon (I), on obtient l'effort tranchant ( $T$ ) et le moment fléchissant  $M_f$  (on obtient en fait respectivement  $-T$  et  $-M_f$ ).



**Figure II.11 Illustration de l'effort intérieur [28]**

$\vec{T}$  somme vectorielle de toutes les forces extérieures transversales situées à gauche de la section fictive =  $\vec{F}_1 + \vec{F}_2$

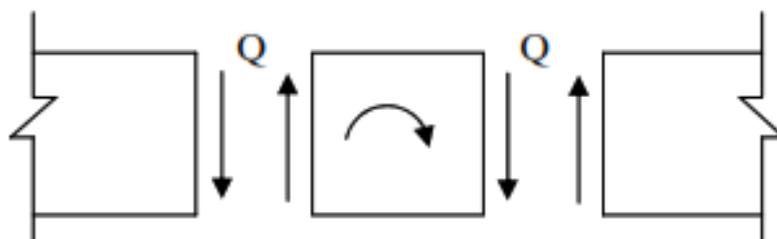
$M_f$  : moment résultant en G de toutes les actions extérieures situées à gauche de la section fictive

$$= MG(\vec{F}_1) + MG(\vec{F}_2)$$

Remarque: le cas  $M_f \neq 0$  avec  $T=0$  correspond à de la flexion pure, alors que le cas  $M_f \neq 0$  avec  $(T) \neq 0$  correspond à de la flexion simple.

### 2.6 EFFORTS TRANCHANTS :

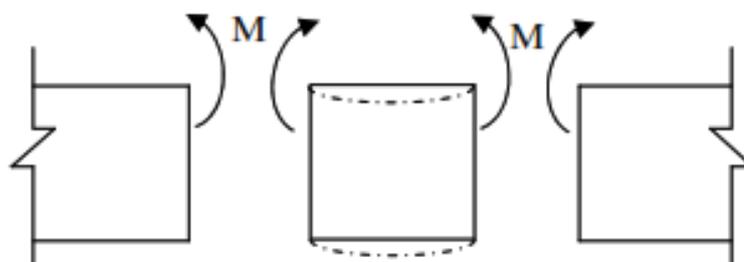
Les forces transversales  $Q_z$ , et  $Q_y$  sont les sommes des projections de toutes les forces intérieures dans la section sur les axes centraux principaux de cette dernière. Ces efforts tranchants provoquent le cisaillement des bords de la section respectivement dans la direction des axes ( $Z$ ) et ( $Y$ ). Le sens de ( $Q$ ) sur le plan est positif par convention quand il tend à faire tourner un élément entre deux sections dans le sens des aiguilles d'une montre.



FigureII.12 Illustration de l'effort tranchant [ 9]

### 2.7 MOMENTS FLECHISSANT :

Les composantes  $M_y$  et  $M_z$  du vecteur moment résultant représentent les sommes des moments de toutes les forces intérieures dans la section, par rapport aux axes d'inertie principaux de cette dernière  $Y$  et  $Z$  respectivement. Le sens positif des moments dans le plan qui par convention tend les fibres inférieures et comprime les fibres supérieures de la section.



FigureII.13 Illustration du moment fléchissant  $M_f$  [ 9]

### 2.8 DIAGRAMMES DE L EFFORT TRANCHANT T ET LE MOMENT FLECHISSANT MF :

Les diagrammes des éléments de réduction permettent de localiser les sections les plus sollicitées (sièges des contraintes les plus élevées) et servent au dimensionnement des différents éléments des structures.

Dans la construction des diagrammes, les valeurs positives et négatives sont portées de part et d'autre d'un axe-origine. Par ailleurs, pour le diagramme du moment fléchissant, on a pour habitude de porter les ordonnées toujours du côté des fibres tendues. Considérants une poutre en

appui simple soumise à des efforts verticaux  $P_1$  et  $P_2$ . On suppose que la poutre possède un plan de symétrie axial tel que les poutres circulaire, rectangulaire et des profilé en  $T$ ,  $I$  et  $U$  [27].

### 2.9 CONDITION DE RESISTANCE EN FLEXION :

Pour les poutres en flexion, on doit limiter les déformations afin d'assurer une rigidité convenable de la structure, on impose une limite à la contrainte normale à partir de la condition de résistance [17].

On a :

$$\sigma_{\max} \leq R_{pe} \tag{II.8}$$

Avec :

**$R_{pe}$**  : résistance pratique  $R_{pe} = \frac{R_e}{S}$

**$R_e$** : la limite élastique et  **$S$**  le coefficient de sécurité adopté)

**$R_{pe}$**  : Résistance pratique à l'extension ( **$MPa$** )

**$R_e$**  : résistance élastique ( **$MPa$** )

**$S$**  : coefficient de sécurité.

Le coefficient de sécurité  **$S$**  permet de prendre en compte les défauts des matériaux utilisés qui ont tendance à affaiblir les pièces. Ils sont donnés par le cahier des charges et sont souvent spécifiques aux métiers (aéronautique, ponts, bâtiments, mécaniques...)

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I_Z} y_{\max} \tag{II.9}$$

Et :

$$R_{pe} = \left( [\sigma^-] \text{ ou } [\sigma^+] \right)$$

Donc :

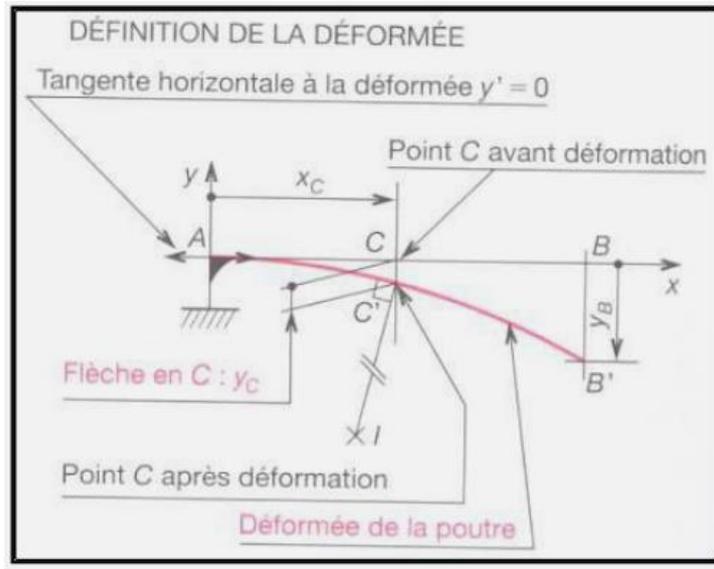
$$\left| \sigma_{\max} \right| = \left| \frac{M}{I_Z} y_{\max} \right| \leq R_{pe} = \left( [\sigma^-] \text{ ou } [\sigma^+] \right) \tag{II.10}$$

$\frac{M}{I_Z}$  [ **$mm^3$** ] : Module de flexion.

$y_{\max}$  [ **$mm$** ] : Distance maximale entre le plan moyen et la fibre la plus éloignée.

**2.10 DEFORMÉE :**

On appelle déformée ou bien la flèche, la poutre après déformation voir la **figure ci-dessous**. L'équation de la déformée est:  $(y)$  est la flèche au point d'abscisse  $(x)$ . Les dérivées première et seconde sont notées  $(y')$  et  $(y'')$ .



**Figure II.14 Illustration de la déformée [29]**

3 cas simples de détermination de l'équation de la déformée d'une poutre en flexion plane.

Les cas plus complexes sont traités dans des ouvrages de **RDM**.

- 1 - Poutre reposant sur deux appuis avec charge concentrée au milieu
- 2 - Poutre reposant sur deux appuis avec charge répartie.
- 3 - Poutre encastree avec charge concentrée à une extrémité.

Hypothèses:

- les appuis sont sans adhérence.
- les charges sont perpendiculaires à la ligne moyenne.

**2.11 RELATION ENTRE FLÈCHE ET MOMENT FLECHISSANT :**

On peut calculer la flèche à partir de l'équation de la déformée par double intégration de l'équation (2.11) du moment fléchissant.

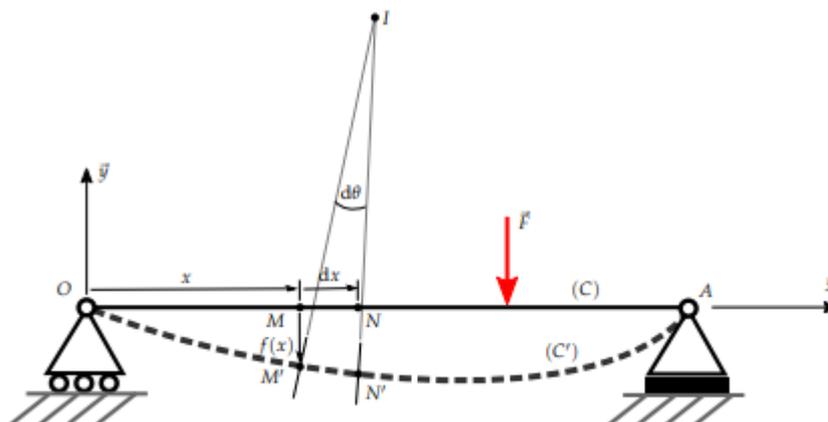
$$EI_{GZ}Y''(x) = -M_{fz} \tag{II.11}$$

- Condition de rigidité en flexion. On calcule la flèche maximale et on vérifie ensuite que cette flèche reste inférieure à une valeur limite  $f$ .

- Théorème de superposition des déformations c'est une Théorème Pour une poutre sollicitée dans son domaine élastique, la déformation due à un système de charges est égale à la somme des déformations dues à l'application successive des charges constituant le système de chargement appliqué initialement.

**2.12 RELATION CONTRAINTE - MOMENT FLECHISSANT :**

La figure II.15 illustre la flèche  $f(x)$  d'une poutre en flexion reposant sur deux appuis, Appui double et appui simple.



FigureII.15 Illustration de la flèche  $f(x)$  d'une poutre en flexion[ 20]

Donc :

$$M_{fz} = C_2 I_{Gz} \tag{II.12}$$

On montre que : linéaire des contraintes  $\sigma_{xx}$

$$\sigma_{xx} = -\frac{M_{fz}}{I_{Gz}} \times y \tag{II.13}$$

**2.13 VALEURS USUELLES DE LA FLECHE POUR DES POUTRES :**

Tableau II.1 : les différents valeurs usuelles de la flèche

poutres	Valeurs usuelles de la flèche
Poutre console avec une charge ponctuelle p à une extrémité	$f = \frac{P \times L^3}{3 \times EI}$
Poutre sur deux appuis simples avec une charge ponctuelle p au milieu	$f = -\frac{P \times L^3}{3 \times EI}$
Poutre sur deux appuis simple avec une charge q uniformément répartie	$f = -\frac{5 \times q \times L^3}{384 \times EI}$

2.14 EXEMPLE :

Considérons la poutre ci-contre, de longueur  $L= 0.5m$ ,

Soumise à une charge ponctuelle en son milieu

L'étude statique permet de déterminer les actions des appuis :

$$V_A = V_B = \frac{P}{2} \Rightarrow \boxed{V_A = 1daN} \text{ et } \boxed{V_B = 1daN}$$

Sur la poutre :

**Moments fléchissant:**

❖ pour  $0 \leq x \leq 0.25$

$$M_{iAC} = -\frac{P}{2}x \Rightarrow M_{iAC} = -\frac{2}{2}x$$

$$\Rightarrow \boxed{M_{iAC} = -x}$$

❖ pour  $0.25 \leq x \leq 0.50$

$$M_{iBC} = -\frac{P}{2}x + P\left(x - \frac{L}{2}\right)$$

$$\Rightarrow M_{iBC} = \frac{P}{2}(x - L)$$

$$\Rightarrow \boxed{M_{iBC} = (x - 0.5)}$$

**Equation de la déformée:**

$$M_{iAC} = -EIy''_{AC} \Rightarrow \boxed{-EIy''_{AC} = -\frac{P}{2}x}$$

**La première intégration donne :**

$$\boxed{EIy'_{AC} = \frac{Px^2}{4} + C_1} \dots\dots\dots(1)$$

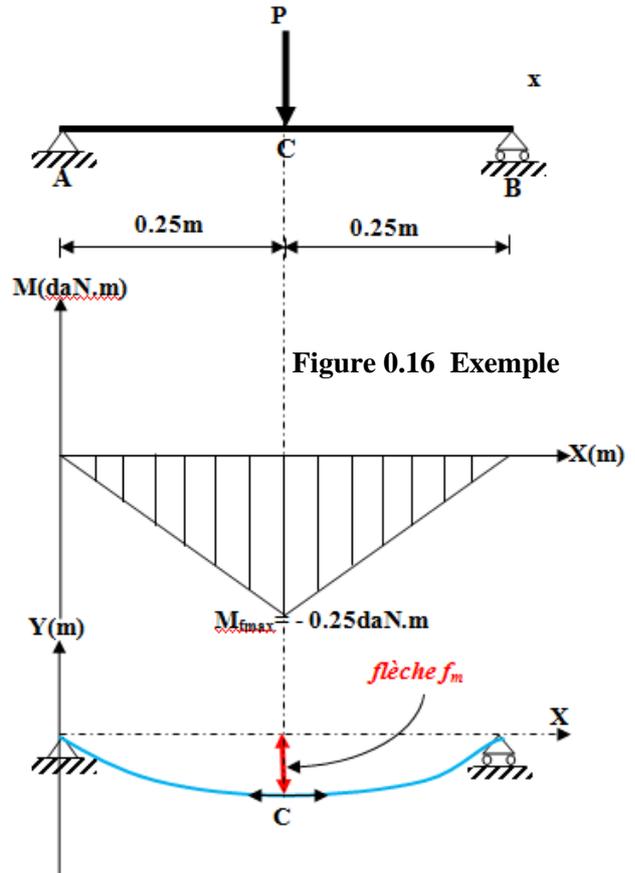


Figure 0.16 Exemple

figure II.16 une poutre fléchée soumise à la flexion simple

**La seconde intégration donne :**

$$\boxed{EIy_{AC} = \frac{Px^3}{12} + C_1x + C_2} \dots\dots\dots(2)$$

*Conditions aux limites:*

□ **on a  $y = 0$  au point A( $x = 0$ ):l'équation (2) donne:  $C_2 = 0$**

$$C_1 = -\frac{P \times (L/2)^2}{4} \Rightarrow \boxed{C_1 = -\frac{PL^2}{16}}$$

□  **$Ety'c = 0$  au point C( $x = L/2$ ):l'équation (1) donne:**

$$y'_{AC} = \frac{P}{4EI} \left[ x^2 - \frac{L^2}{4} \right] \quad \text{et} \quad y_{AC} = \frac{P}{4EI} \left[ \frac{x^3}{3} - \frac{L^2}{4}x \right]$$

**Finalemnt :**

*Flèche:* la flèche maximale est obtenue pour  $x = L/2$  :

$$\boxed{f_{\max} = y_c = -\frac{PL^3}{48EI}}$$

**1.6 CONCLUSION :**

Ce deuxième chapitre permet de présenter les aspects utiles et nécessaires, les plus courants utilisés pour étudier les poutres en flexion. Nous avons cité les différents points essentiels pour l'étude comme ,efforts extérieurs et intérieurs , contrainte normale, contrainte tangentielle en flexion, efforts tranchants, moments, condition de résistance en flexion, déformée, la relation entre la flèche et le moment fléchissant, la flèche, la relation entre la contrainte et le moment fléchissant et les valeurs usuelles de la flèche pour des poutres. A la fin de ce chapitre, tout d'abord nous avons donné un exemple de calcul détaillé pour expliquer cette étude de coté analytique.

# *Chapitre*

# *03*



### 3. NOTIONS GÉNÉRALES DE BÉTON ARMÉ

#### 3.1 INTRODUCTION :

Cette partie présente des notions générales concernant le béton armé, en effet, ce matériau est obtenu lorsque deux éléments sont mélangés : béton et acier. Si l'on combine les caractéristiques de chacun de ces matériaux, on constate les avantages de la combinaison : d'une part, le béton est un matériau qui résiste bien à la compression ; cependant, il n'est pas aussi efficace contre la traction. De son côté, l'acier peut résister à la compression et à la traction sans inconvénients. Ainsi, nous pouvons déjà visualiser les propriétés du béton armé une fois qu'il est élaboré. En béton armé la première structure à été conçue en 1855 par l'ingénieur français Joseph Lambot.

#### 3.2. CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES MATÉRIAUX :

##### 3.2.1 Le béton :

Le béton est un matériau constitué par le mélange du ciment granulats (sable, gravillons) et d'eau de gâchage, Le béton armé est obtenu en introduisant dans le béton des aciers (armatures) disposés de manière à équilibrer les efforts de traction. La composition d'un mètre cube du béton est la suivante :

- 350 kg de ciment CEM II/ A 42,5
- 400 L de sable  $C_g \leq 5 \text{ mm}$
- 800 L de gravillons  $C_g \leq 25 \text{ mm}$
- 175 L d'eau de gâchage [31]



Figure III.1 Mélange du béton [32]

### 3.3.2 Différents types du béton

On distingue trois types de béton selon son les applications structurales:

- Béton non armé
- Béton armé
- Béton précontraint [33]

#### **a-Béton non armé (concrète)**

Il est employé pour les ouvrages travaillant surtout en traction (exemple : grands barrages massifs). La forme de l'ouvrage est alors étudiée pour solliciter le béton essentiellement en compression c'est face à cette sollicitation qu'il est le plus performant. On limite autant que faire se peut les contraintes de traction. [33]

#### **b-Béton précontraint (prestesse concrète) :**

Il s'agit de structures dans lesquelles les armatures sont mises en tension avant l'application de charges ; on met ainsi le béton en compression. Cela lui permet de mieux résister aux contraintes de traction. [33]

#### **c-Béton armé (renforce concrète) :**

Il est utilisé pour les cas où la structure est aussi sollicitée en traction. Les armatures métalliques sont disposées dans les zones sollicitées en traction. Elles permettent de suppléer le béton qui est lui très mauvais en traction. [33]

### 3. 3.3 L'objectif du béton armé

On peut citer quelques objectifs nécessaires pour le choix du béton armé:

- Choix des formes
- Capacité portante élevée
- Bonne durabilité
- Bonne résistance au feu
- Économique

Évidemment le béton armé présente des inconvénients :

- Poids propre élevé
- Faible isolation thermique
- Esthétique discutable

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

Le principe sera de combiner les avantages du béton avec ceux de l'acier, tout en minimisant les défauts des deux matériaux [34].

Béton :

- Bonne résistance en compression
- Mauvaise résistance en traction
- Peu cher [33]

### 1-1-5/Résistance mécanique à la compression $f_{cj}$ :

Le béton est caractérisé par sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours, dite valeur caractéristique requise ; notée  $f_{c28}$  [32].

Tableau III.1 Résistances du béton à la compression. [32]

Condition	$f_{c28} \leq 40MPa$	$f_{c28} > 40MPa$
$j < 60 \text{ jours}$	$f_{cj} = j/(4.76 + 0.83j)$	/
$j > 60 \text{ jours}$	$f_{cj} = 1.1 \times f_{c28}$	/
$j < 28 \text{ jours}$	/	$f_{cj} = j/(1.4 + 0.95j)$
$j > 28 \text{ jours}$	/	$f_{cj} = f_{c28}$

Tableau III.2 Résistances du béton à la traction. [32]

Condition	$f_{c28} < 60MPa$	$f_{c28} > 60MPa$
1	$f_{tj} = 0.6 + 0.06f_{cj}$	/
2	/	$f_{tj} = 0.275 \times f_{cj}^{2/3}$

### 3.3 NOTIONS D'ÉTATS LIMITES :

La performance d'une structure et de ses composants est décrite à l'aide de fonctions d'état limite qui séparent les états souhaités des états indésirables. Les effets physiques du dépassement d'un état limite peuvent être réversibles ou irréversibles. Pour le cas réversible, la suppression de la cause du dépassement permet à la structure de revenir à un état souhaité. Pour le cas irréversible, il n'en va pas de même et certaines conséquences, comme des dommages, peuvent survenir selon la nature de l'état limite. Les conséquences peuvent, à leur tour, être récupérables ou irrécupérables à partir de l'état déformé. Par exemple, si le dommage est limité, disons, sous la forme d'un ensemble permanent localisé dans un cas où celui-ci n'est pas souhaité, la condition peut être

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

---

réparable, par exemple, en remplaçant les pièces affectées. Les états limites sont généralement classés en quatre types [35]

### **États limites de service (ELS) :**

Qui représentent des critères régissant une utilisation fonctionnelle ou opérationnelle normale. Ils sont relatifs aux conditions d'exploitation ou de durabilité afin de limiter:

- La contrainte de compression du béton;
- la formation de fissure préjudiciables et les risques de corrosion des armatures;
- les déformations excessives d'éléments porteurs tels que les poutres, les planchers par limitation des flèches. Les critères de conception de l'état limite de service (ELS):
- Contraintes limitées du béton et de l'acier ;
- calculs de type élastique **allongement-contrainte** tenant compte du module d'élasticité des matériaux.

### **États limites ultimes (ELU) :**

qui représentent la défaillance de la structure et de ses composants généralement lorsqu'ils sont soumis à des valeurs extrêmes d'actions ou d'effets d'action. En outre, ils correspondent à la limite :

- De l'équilibre statique.
- de la résistance de l'un des matériaux.
- ou de la stabilité de forme

Ils sont basés sur l'atteinte maximale de la capacité portante de l'ouvrage sans risque de rupture par écrasement, renversement, déformation excessive.

### **Les critères de conception états limites ultimes (ELU):**

- utilisation de diagrammes déformations-contraintes proches du comportement des matériaux allongements et raccourcissements limites des matériaux ;
- application de coefficients de sécurité en fonction de la durée d'application des charges.

### **États limites de fatigue (FLS) :**

Qui représentent l'accumulation de dommages (conduisant à la fissuration lorsque certaines limites sont dépassées) sous des actions répétitives.

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

### États limites accidentels (ALS) :

Qui représentent des situations d'événements accidentels ou anormaux. Dans l'évaluation des états limites, ces différents états limites sont pris en compte par rapport à différents niveaux de sécurité cibles ; la cible à atteindre pour tout type particulier d'état limite est fonction des conséquences et de la facilité de rétablissement à partir de cet état.

### 3.2.4 État-limite ultime de résistance :

#### -Hypothèses de calcul :

On peut citer les différentes hypothèses de calcul:

- 1-Les sections droites restent planes et il n'y a pas de glissement relatif entre les armatures et le béton.
- 2-La résistance à la traction du béton est négligée.
- 3-Les déformations des sections sont limitées pour l'allongement unitaire de l'acier à 10%, pour le raccourcissement unitaire du béton à 3,5‰ en flexion et 2‰ en compression simple [39].

#### a-Diagramme contraintes-déformations de calcul du béton :

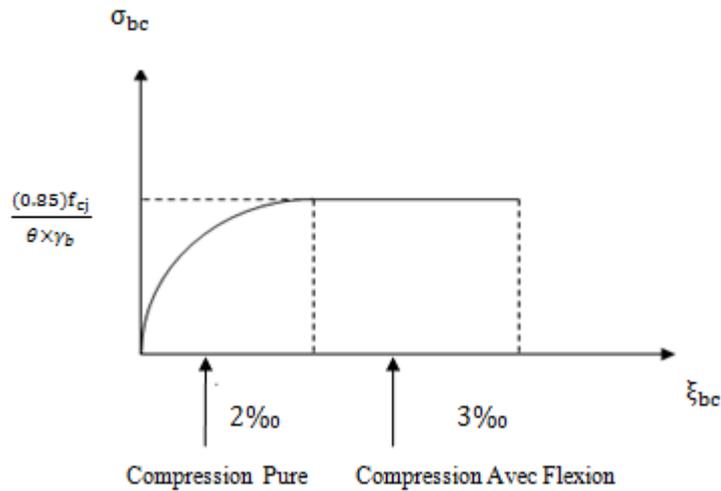
-Le diagramme contraintes-déformations du béton pouvant être utilisé dans tous les cas est le diagramme de calcul dit "parabole -rectangle" (Figure III.2). IL comporte un arc de parabole du second degré d'axe parallèle à l'axe des contraintes de compression  $\sigma_{bc}$  suivi d'un segment de droite parallèle à l'axe des déformations  $\epsilon_{bc}$  et tangent à la parabole en son sommet. Ce segment s'étend entre les valeurs 2‰ et 3,5 ‰ de la déformation  $\epsilon_{bc}$ . L'arc de parabole s'étend de l'origine des coordonnées jusqu'à son sommet de coordonnées

$$\epsilon_{bc} = 2 \text{‰} f_{bu} = 0,85 f_{cj} / \theta \cdot \gamma_b \quad (\text{III.1})$$

Tableau III.3 Explication de les deux coefficients ( $\gamma_b$  et  $\theta$ ) [36]

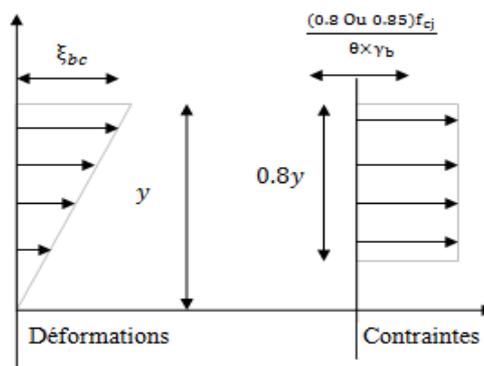
Le coefficient $\gamma_b$	combinaisons	Le coefficient $\theta$	t
1,5	fondamentales	1	t > 24h
1,15	accidentelles	0.9	24h > t > 1h
		0.85	t < 1h

Avec t: la durée probable d'application de la combinaison d'actions



**Figure III.2** Diagramme parabol rectangle du béton

Lorsque la section considérée n'est pas entièrement comprimée, il est permis d'utiliser le diagramme rectangulaire simplifié défini sur la figure III.3, dans laquelle  $Y_u$  désigne la distance de l'axe neutre de la déformation à la fibre la plus comprimée [1]. Sur une distance  $0,2 Y_u$  à partir de l'axe neutre la contrainte est nulle, et sur la distance  $0,8 Y_u$ , la contrainte vaut  $(0,85 f_{cj} / \theta \cdot \gamma_b)$  pour les zones comprimées dont la largeur est croissante (ou constante) vers les fibres les plus comprimées et  $(0,8 f_{cj} / \theta \cdot \gamma_b)$  pour les zones comprimées dont la largeur est décroissante vers ces mêmes fibres.



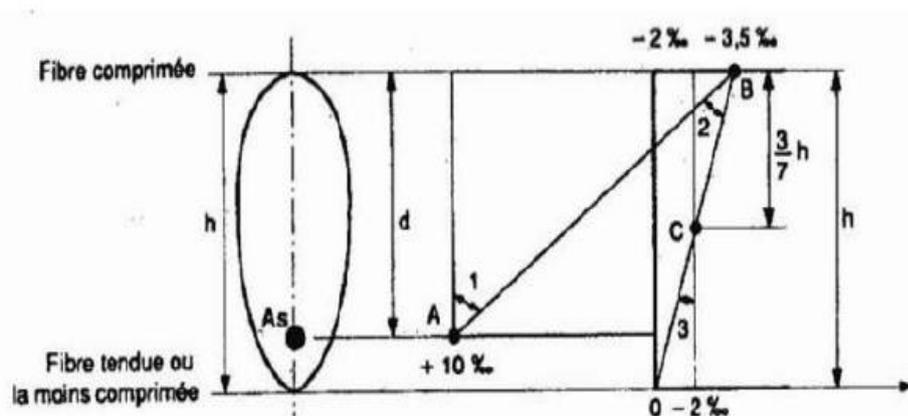
**Figure III.3** explication du diagramme rectangulaire simplifié du béton

**b- Diagramme des déformations limites de la section en béton armé (règle des trois pivots) :**

Le diagramme des déformations limite de la section en béton armé, est les diagrammes possibles résultant des déformations limites fixées pour les matériaux. Les trois domaines représentés sur la figure 3.4, sont définis à partir des pivots A, B, et C. Dans le domaine 1 le

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

diagramme passe par le point A qui correspond à un allongement de 10 % de l'armature la plus tendue supposée concentrée en son centre de gravité. Dans le domaine 2 le diagramme passe par le point B qui correspond à un raccourcissement de 3,5 % de la fibre la plus comprimée. Dans le domaine 3 le diagramme passe par le point C qui correspond à un raccourcissement de 2 % du béton à une distance de la fibre la plus comprimée égale à  $\frac{3}{7}$  de la hauteur totale  $h$  de la section.



**Figure III.4** illustration du diagramme déformation limites de la section en béton armé (règle des trois pivots)

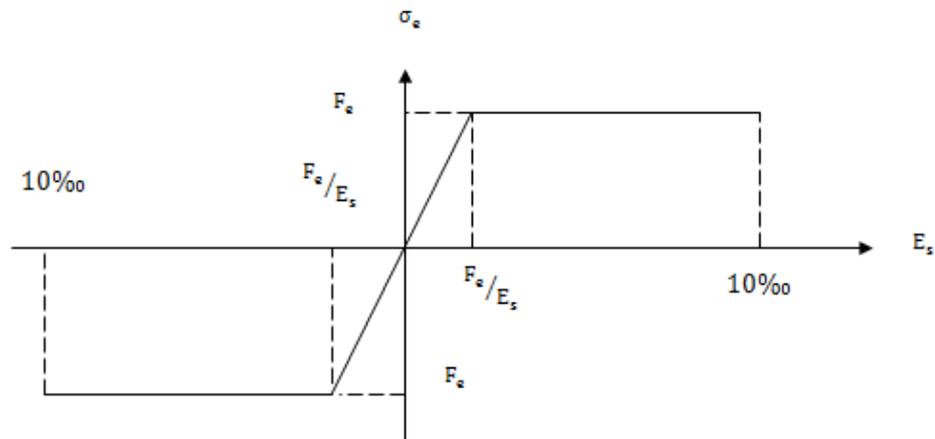
### c- Diagramme déformations-contraintes de calcul de l'acier :

Le calcul des aciers est représenté sur le diagramme (voir la figure 3.4)

Pour les combinaisons fondamentales le coefficient  $\gamma_s = 1,15$

Pour les combinaisons accidentelles le coefficient  $\gamma_s = 1$ .

-On peut supposer concentrée en son centre de gravité la section d'un groupe de plusieurs barres, tendues ou comprimées, pourvu que l'erreur ainsi commise sur la déformation unitaire ne dépasse pas 15 %.



**Figure III.4** : illustration du diagramme déformation- contraintes de calcul de l'acier

### 1-1-7/Etats-limites de service vis-à-vis de la durabilité de la structure:

Les vérifications à effectuer portent généralement sur un état limite de compression du béton et sur un état limite d'ouverture des fissures.

#### **Hypothèses de calcul :**

Les calculs sont conduits en considérant les hypothèses suivantes :

- Les sections droites restent planes et il n'y a pas de glissement relatif entre les armatures et le béton en dehors du voisinage immédiat des fissures.
- Le béton tendu est négligé.
- Le béton et l'acier sont considérés comme des matériaux linéairement élastiques et il est fait abstraction du retrait et du fluage du béton.
- Par convention le rapport  $n$  du module d'élasticité longitudinale de l'acier à celui du béton ou coefficient d'équivalence a pour valeur 15 à long terme.
- On ne déduit pas dans les calculs les aires des aciers de l'aire du béton comprimé.
- On suppose, concentrée en son centre de gravité, l'aire d'acier de la section transversale d'un groupe de plusieurs armatures, pourvu que l'erreur ainsi commise ne dépasse pas 15 %.

### 1-1-8/ Etat -limite de compression du béton :

La contrainte de compression du béton est limitée à :

$$\sigma_{bc} = 0,6 f_{cj} [36]$$

### 1-1-9/L'état limite de service d'ouverture des fissures :

On limite les fissures, pour la durabilité et la sécurité des ouvrages.

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

---

3 cas peuvent se présenter :

### **a-Fissuration préjudiciable :**

lorsque les éléments de structure sont soumis aux intempéries, à des condensations ou peuvent être alternativement noyés ou immergés en eau douce .Dans ce on cas limite la contrainte de traction des armatures à :

$$\sigma_{ser} = \min \left\{ \left( \frac{2}{3} \right) \cdot f_e ; 110 f_{tj} \right\} \quad \text{en MPa}$$

Avec :

$f_e$  : la limite élastique des aciers utilisés.

$f_{tj}$  : la résistance caractéristique à la traction du béton exprimée en MPa.

$\eta$  : un coefficient numérique, dit coefficient de fissuration qui vaut :

$\eta = 1$ , pour les ronds lisses y compris les treillis soudés formés de fils tréfilés lisses

$\eta = 1,6$  pour les armatures à haute adhérence, sauf le cas des fils de diamètre inférieur à 6 mm pour lesquels on prend 1,3

-Le diamètre des armatures les plus proches des parois est au moins égal à 6 mm.

-Dans le cas des dalles et des voiles faisant au plus 40 cm d'épaisseur, l'écartement des armatures d'une même nappe est au plus égal à la plus petite des deux valeurs 25 cm et  $2h$  ( $h$  désignant l'épaisseur totale de l'élément). [37]

### **b-Fissuration est peu préjudiciable :**

Les règles minimales à appliquer sont les suivantes :

- Pour éviter des fissurations abusives dans les pièces relativement sollicitées, il convient de concevoir des éléments non fragiles et de prévoir s'il y a lieu des armatures de peau.

- Certains éléments font l'objet de règles forfaitaires consacrées par l'expérience. Il s'agit notamment des dalles sur appuis continus (A.7.2.), des poutres (A.7.3.) et de certaines parties de bâtiments courants (B.5.) [38].

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

---

c-Fissuration est très préjudiciable :

La fissuration est considérée comme très préjudiciable lorsque les éléments étudiés sont exposés à un milieu agressif ou bien doivent assurer une étanchéité.

-La contrainte de traction des armatures, a pour valeur :

$$\sigma_{ser} = \min \left\{ (1/2) \cdot f_e ; 90 f_{tj} \right\} \quad \text{en MPa}$$

-Le diamètre des armatures est au moins égal à 8 mm.

- Pour les poutres de grande hauteur, les armatures de peau, ont une section au moins égale à 5 cm<sup>2</sup> par mètre de longueur de parement.

-Lorsque la membrure tendue d'une poutre est constituée de barres de diamètre supérieur à 20 mm, l'écartement de celles-ci dans le sens horizontal est au plus égal à 3 fois leur diamètre.

- Dans le cas des dalles et des voiles faisant au plus 40 cm d'épaisseur, l'écartement des armatures d'une même nappe est au plus égal à la plus petite des deux valeurs 20 cm et 1,5 h (h épaisseur totale de l'élément). [39]

### 1-1-10/ Les différents types d'actions et sollicitations :

#### 1/ Les actions :

On appelle actions, les forces et charges appliquées aux déformations imposées. On distingue trois types d'actions :

- Actions permanents.
- Actions variables (d'exploitations).
- Actions accidentelles.

#### a-Actions permanentes (G) :

Ce sont des actions continues dans l'intensité est constantes ou très peu variables dans le temps. Exemple : le poids propre.

#### b-Actions variables(Q) :

Ce sont des actions dans l'intensité varié fréquemment et d'une façon importante dans le temps. La durée d'applications est très faible par rapport aux durées de vie de construction. Les valeurs de ces charges sont fixées par le règlement, en fonction des conditions d'exploitation de la construction.

#### c-Actions accidentelles (Fa) :

Ce sont les actions provenant de phénomènes ce produisant rarement avec une faible durée d'application. Exemple : Vent, séisme... [40]

#### 2/ Les notions des sollicitations

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

---

Les sollicitations sont des efforts (effort normal, effort tranchant) et les moments (moment de flexion, moment de torsion) calculés à partir des actions par des méthodes appropriées. Les calculs sont conduits suivant des méthodes scientifiques appuyées sur des données expérimentales. [36]

b-Règles générales :

D'une façon générale les sollicitations sont calculées en utilisant pour la structure un modèle élastique et linéaire. On emploie les procédés de la résistance des matériaux dans la mesure où la forme des pièces le permet. Pour la détermination des inconnues hyperstatiques de toute nature, les calculs sont conduits à partir des sections brutes, c'est-à-dire sans déduction des vides qui peuvent être réservés dans certaines sections [38]. Dans tous les cas, les sollicitations sont déterminées à partir des méthodes de la résistance des matériaux, pour la section du béton seul. Elles sont donc appliquées au niveau du centre de gravité de la section du béton seul.

c-Simplifications admises :

- Lorsque les inconnues hyperstatiques ne dépendent pas de la valeur du module d'élasticité, il est permis d'introduire (dans les équations qui servent à leur détermination), les constantes mécaniques (aires et moments d'inertie par exemple) calculées sur les sections du béton seul des pièces supposées non fissurées et abstraction faite de leurs armatures; cette approximation n'est cependant valable que dans la mesure où les rapports des déformabilités des différentes pièces composant la structure ne sont pas fondamentalement changés.
- Les sollicitations dites du second ordre peuvent souvent être négligées, sauf lorsqu'il s'agit de vérifier l'état limite ultime de stabilité de forme.
- Pour les éléments dont les conditions d'encastrement sur appuis peuvent s'écarter considérablement des conditions correspondant au modèle élastique et linéaire, il est admis d'évaluer les moments d'encastrement à des fractions forfaitaires des moments maximaux qui seraient supportés par la pièce si elle était articulée sur ces appuis.
- Pour la vérification à l'état limite ultime, il est souvent possible de négliger les sollicitations dues aux déformations imposées dans la mesure où la ductilité des pièces en cause et la souplesse de leurs attaches l'autorise.
- Il est permis d'avoir recours, en certains domaines à des méthodes de calcul simplifiées. [38]

**1-2/L'Acier :**

Au cours des premières décennies de l'histoire du béton armé, les armatures étaient constituées de barres d'acier doux, lisses, de section circulaire dont la limite d'élasticité était habituellement comprise entre 215 et 235 **MPa**. Ce type d'acier n'est pratiquement plus utilisé. On utilise désormais des aciers de limite d'élasticité plus élevée afin de réduire les sections d'armatures.

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

---

Pour améliorer l'adhérence des armatures au béton on crée à la fabrication des aspérités en saillie ou en creux. Les aspérités en saillie inclinées par rapport à l'axe de la barre sont appelées « verrous ». Les aspérités en creux sont appelées « empreintes ». Ces aciers sont dits à Haute Adhérence (HA) et ont couramment une limite élastique de 500MPa.

### 1-2-1/Production des aciers pour béton :

La haute limite d'élasticité peut être obtenue par différents moyens :

- en jouant sur la composition chimique, en particulier en augmentant la teneur en carbone.
- \_ Ce type d'acier présente des inconvénients notamment dans les domaines de l'aptitude au façonnage et au soudage. Il est maintenant abandonné en Europe;
- par écrouissage, par étirage et ou laminage à froid de barres ou fils d'acier doux ;
- par traitement thermique (trempe et auto revenu) de barres ou fils d'acier doux.
- \_ Les aciers se présentent sous forme de barres de grande longueur (souvent 12 m) ou de fils en couronnes. Les cycles de productions utilisés aujourd'hui sont en annexe.
- \_ Les diamètres commerciaux des barres indépendantes sont (en mm)

6 8 10 12 14 16 20 25 32 40

En barres droites, les longueurs courantes de livraison sont comprises entre 12 et 18 m. Les treillis soudés sont livrés sous forme de panneaux de dimensions 2,40x6,00 pour la plupart. (Voir annexe). Pour les barres de diamètre 6, 8, 10 et 12 mm, la livraison est également possible en couronne. Dans ce cas les armatures sont redressées à l'aide d'une machine appelée "redresseuse".

### 1-2-2/Normes et documents de définition :

Les produits en acier pour béton armé sont essentiellement définis par des normes. Les nuances définies dans ces normes sont désignées par des lettres Fe E, Fe TE (acier tréfilé), TLE (acier à très haute limite élastique) suivies d'un nombre indiquant la valeur spécifiée de limite d'élasticité exprimée en **MPa**. Exemples : Fe E 235 ou Fe E 500. De plus les barres et fils à haute adhérence, bénéficiant d'une homologation font l'objet d'une fiche d'identification.

### 1-2-3/Caractéristiques mécaniques de béton armé :

Les caractéristiques mécaniques servant de base aux calculs des éléments de béton armé sont:

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

La limite élastique garantie notée  $f_e$  :  $f_e = 500 \text{ MPa}$  Suivant les types d'acier, cette limite peut être apparente (acier doux, naturellement durs) ou fixée conventionnellement à  $2.10^{-3}$  d'allongement rémanent (fils tréfilés lisses). Le module d'élasticité de l'acier est pris égal à

$$E_s = 200.000. \text{ [41]}$$

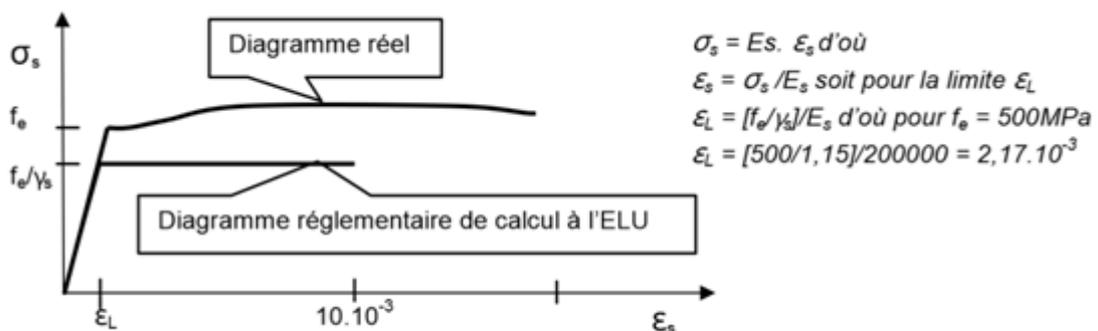
-Les caractéristiques servant de base aux justifications sont La limite d'élasticité garantie  $f_e$ , définie en **MPa**:

**Tableau III.4** : caractéristique mécanique de béton armé [41]

Types	Nuances	f (M Pa)
Ronds lisses	FeE215	215
	FeE235	235
Haute adhérence (H.A.)	FeE400	400
	FeE500	500
Fils HA	FeTE500	500
Fils tréfilés	TSL500	500

### 1-2-4/ Explication du diagramme contrainte - déformation de l'acier :

Comme pour le béton, il faut distinguer le diagramme contrainte - déformation réel du diagramme conventionnel de calcul à l'ELU qui sera utilisé pour le dimensionnement des éléments de béton armé [42].



A l'ELU normal  $\gamma_s = 1,15$  et à l'ELUU accidentel  $\gamma_s = 1$

**Figure III.5** illustration du diagramme expérimental (contraintes – déformations) d'une cas en traction simple et diagramme conventionnel de calcul. [9]

## CHAPITRE 3 : NOTIONS GÉNÉRALES CONCERNENT LE BÉTON ARMÉ

---

### CONCLUSION :

Ce troisième chapitre permet de présenter quelques aspects utiles et nécessaires, liés au béton armé, comme les caractéristiques mécaniques des matériaux, différents types de béton, Les différentes résistances mécaniques utilisées pour le béton, tels que la résistance à la compression  $f_{cj}$ , la résistance à la traction, état-limite ultime de résistance avec ses hypothèses de calcul. Ainsi, les diagrammes déformations-contraintes pour le calcul de l'acier et contraintes-déformations de calcul du béton ont été présentés et expliqués.

# *Chapitre*

**04**



## **CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres**

---

### **4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE COMPORTEMENT DE POUTRE**

#### **4.1 INTRODUCTION**

Dans ce chapitre nous allons présenter une étude numérique de modélisation on utilise la méthode des éléments fins d'un comportement des poutres. Notre modèle éléments finis a été modélisé en utilisant le logiciel Abaqus. L'objectif du modèle est d'analyser le comportement linéaire de poutre en béton armé.

Sous Abaqus, les éléments de type C3D8R ont été utilisés pour modéliser la poutre et les deux plaques, en outre les éléments de type T3D2 ont utilisés pour modéliser les armatures et les treillis. La figure présente l'exemple de maillage des différents éléments.

#### **4.2 ASPECTS GÉNÉRALES SUR LA MODÉLISATION NUMÉRIQUES :**

##### **4.2.1 La méthode des éléments finis :**

C'est la méthode de calcul et de simulation la plus utilisée au sein du génie américain, civil, aérospatial, des matériaux, .... Elle permet d'approximer avec une précision arbitraire une multitude de problèmes en mécanique des solides : élastiques et inélastiques, stationnaires et transitoires, linéaires et non linéaires, parmi les codes utilisés en éléments finis sont disponibles sur le marché commercial : Abaqus, Ansys, Nastran, Adina, LS-Dyna, etc.

##### **4.2.2 Logiciel Abaqus :**

Abaqus est un programme d'éléments finis commercialisé par la société française Dassault Systèmes C'est l'un des programmes FE les plus utilisés au monde, notamment pour les calculs non linéaires de solides déformables. Il est composé de trois produits qui sont : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommées mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour analyse par éléments fini, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples.

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

### 4.2.3 Description des fichiers d'ABAQUS :

ABAQUS est un solveur (Standard, Explicit, Implicite, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier (entrée) ou fichier de données d'extension (**Inp**) et qui écrit la solution dans un fichier (de sortie) ou fichier de résultats d'extension (**Odb**) présente dans le Tableau 4.1 ci-deussous.

Tableau IV .1 les deux fichiers nécessaires de Abaqus

Le fichier (texte) de données :	Le fichier de résultat :
Extension : <b>Inp</b> Contenu : mots clés qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions aux limites, Extension	Extension : <b>Odb</b> Contenu : contours et courbes résultats

### 4.2.4 Modélisation des éléments

L'élément C3D8R est un élément de brique linéaire à usage général, avec une intégration réduite (1 point d'intégration). Les fonctions de forme sont les mêmes que pour l'élément C3D8R et peuvent être trouvées dans [36]. La numérotation des nœuds suit la convention de la Figure 4.1(a) et le point d'intégration est illustré à la Figure 4.1(b).

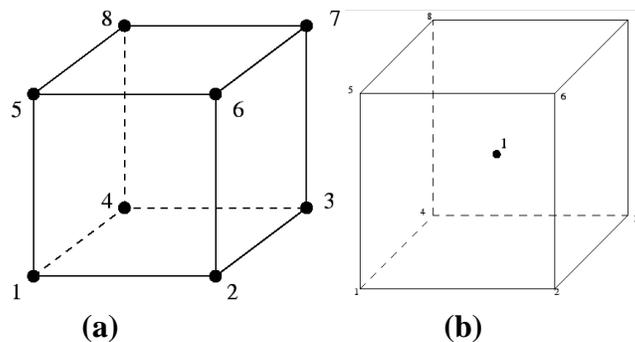


Figure IV .1 (a)Éléments de brique à 8 nœuds (b) Schéma de points d'intégration 1x1x1 en éléments hexaédriques

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

### 4.3 MODÈLE NUMÉRIQUE :

Le modèle de notre travail considéré à des dimensions comme illustre dans la figure IV.2. La structure en béton armé avec des propriétés mécaniques voir les tableaux 4.2 et 4.3. Le maillage paramétrique et composé de 2777 nœuds et 1851 éléments de brique linéaire à usage général, avec une intégration réduite (1 point d'intégration) de type (C3D8R) a été utilisé pour faire la modélisation de la poutre et des plaques, les éléments T3D2 de treillis à déplacement linéaire à 2 nœuds ont été utilisés pour faire la modélisation des armatures et les treillis. En outre les conditions aux limites de la modélisation du comportement linéaire de la poutre sont les suivantes : le support fixe a été appliqué sur la surface inférieure de la poutre ( $U_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ ), la surface supérieure de la poutre supporte une charge de contrainte  $\sigma$ , la bordure droite est bloquée par un encastrement  $U_3=UR_1=UR_2=0$ , un appui fixe sur la plaque inférieure et le déplacement/rotation  $U_2=-50$ . Les conditions aux limites est illustrée sur à la figure III. 6 de taille globale a été utilisé pour les plaques et 32 pour la poutre, pour les armatures 30, 15 pour les treillis

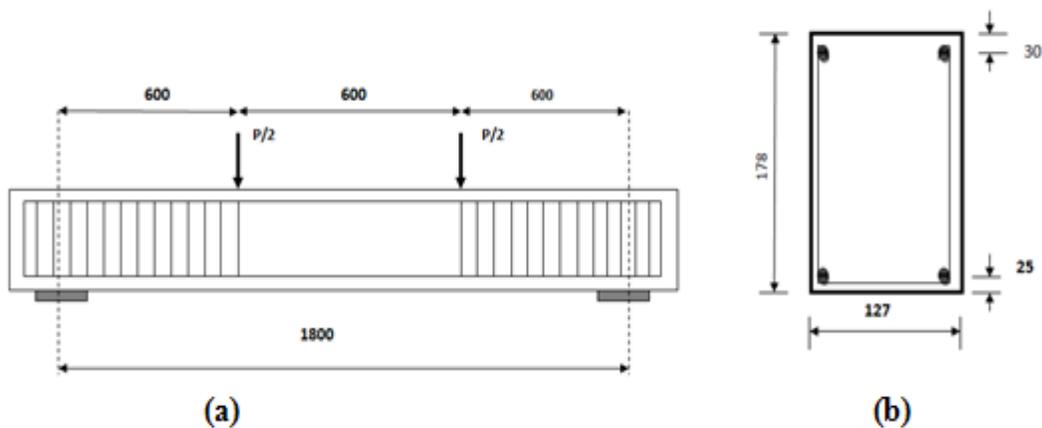


Figure IV .2géométrie du modèle

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

### 4.3.1 Propriétés des matériaux

Tableau IV.2 les caractéristiques des matériaux

	Masse density	Modulusyoung	Poisson ration
Acier linéaire	7.5E-9	200000	0.3
Acier non linéaire armature	7.5E -009	200000	0.3
Béton linéaire	2.4 E-9	28100	0.235
Béton non linéaire	2.4e^9		
Acier non linéaire treilles	7.5E-009	200000	0.3
Acier linéaire treilles	7.5 E-009	200000	0.3

	fYield stress		Plastic strain	
Acier non linéaire treilles	1	340	1	0
	2	440	2	0.1
	3	0.1	3	0.11
Acier non linéaire armature	1	461	1	0
	2	676	2	0.1
	3	0.1	3	0.11

### 4.4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE :

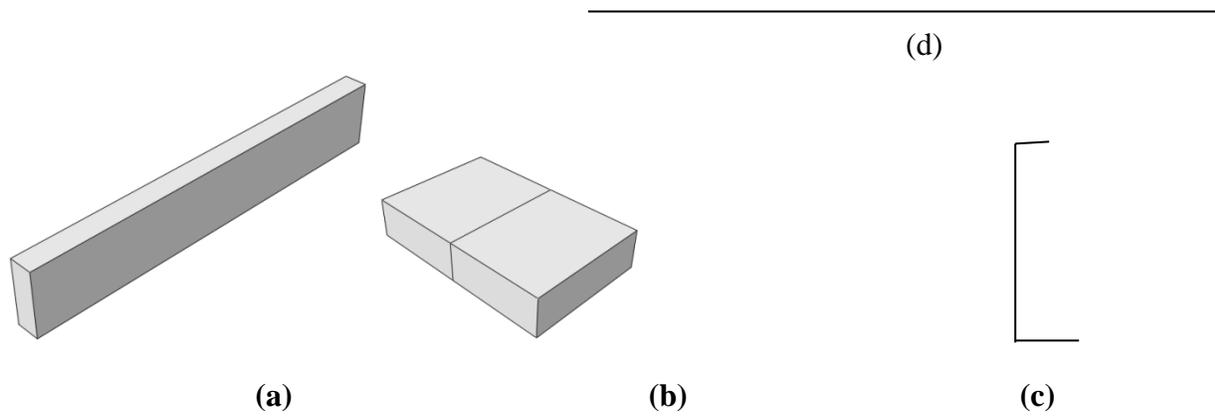
Dans cette partie on peut présenter en détaille la modélisation numérique de notre travail, on commence par la conception des pièces, l'assemblage, Interaction (contacte) entre les différentes pièces, les conditions aux limites (Loed), le maillage (mesh) et se termine par l'obtention des différentes résultats par le module (job).

#### 4.4.1 Les différentes pièces de notre travail :

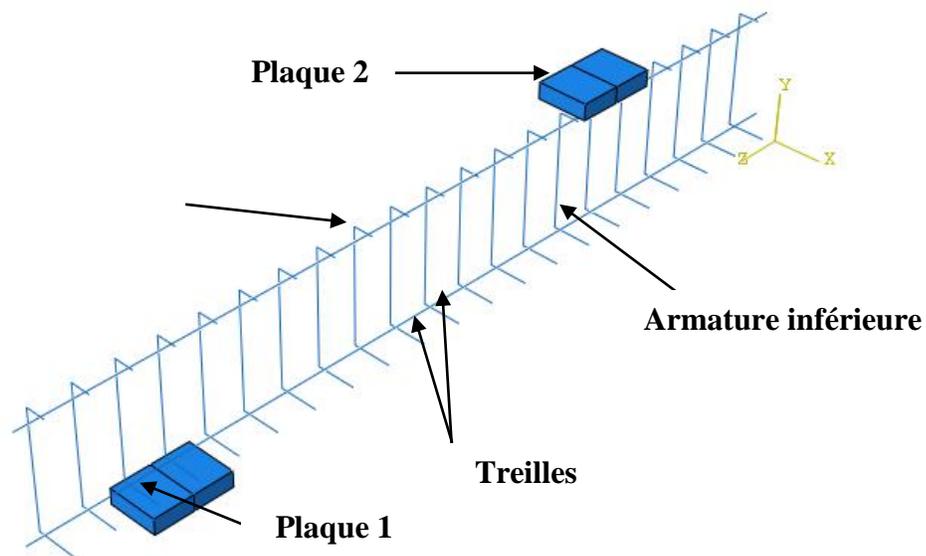
Dans cette partie nous avons présenté les différentes pièces qui comportent le modèle de modélisation d'une poutre à des comportements linéaires, tels que la poutre, les deux plaques, les treilles et les armatures.

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

---



**Figure IV.3** les différentes parties de notre modèle; a) poutre, b) plaque, c) treilles et d) armatures



**Figure IV.4** l'assemblage des différentes parties du modèle; plaques, treilles et armatures

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

### 4.4.2 Module Interaction :

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Le passage par ce module n'est obligatoire que s'il y'a plusieurs instances qui sont en contact.

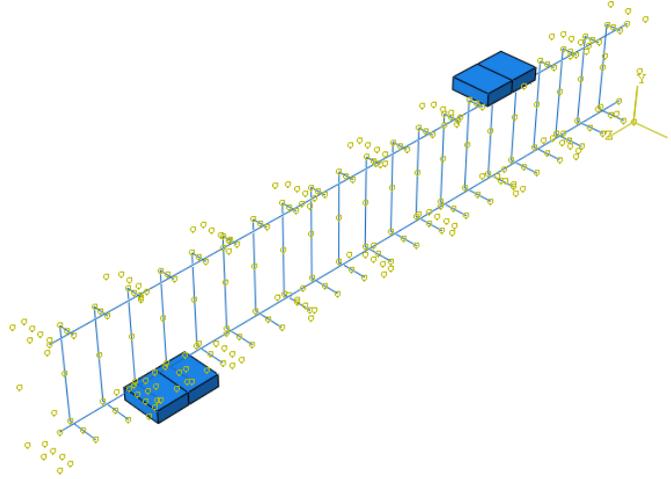
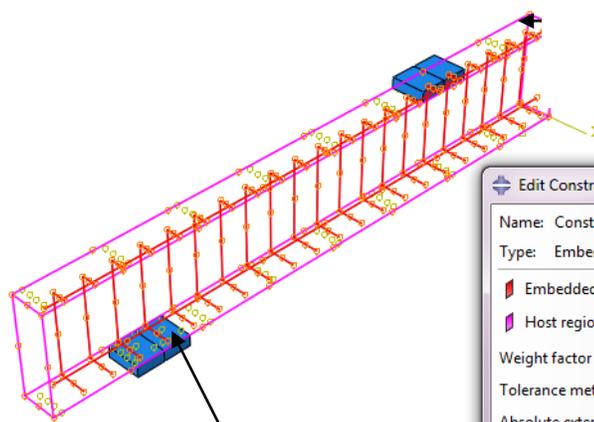


Figure IV.5 la partie de l'interaction



La partie de contact entre la plaque 1 et la poutre

La partie de contact entre la plaque 1 et la poutre

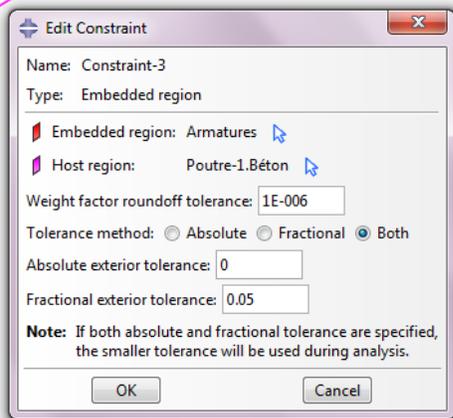


Figure IV .5 les différentes régions intégrées

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

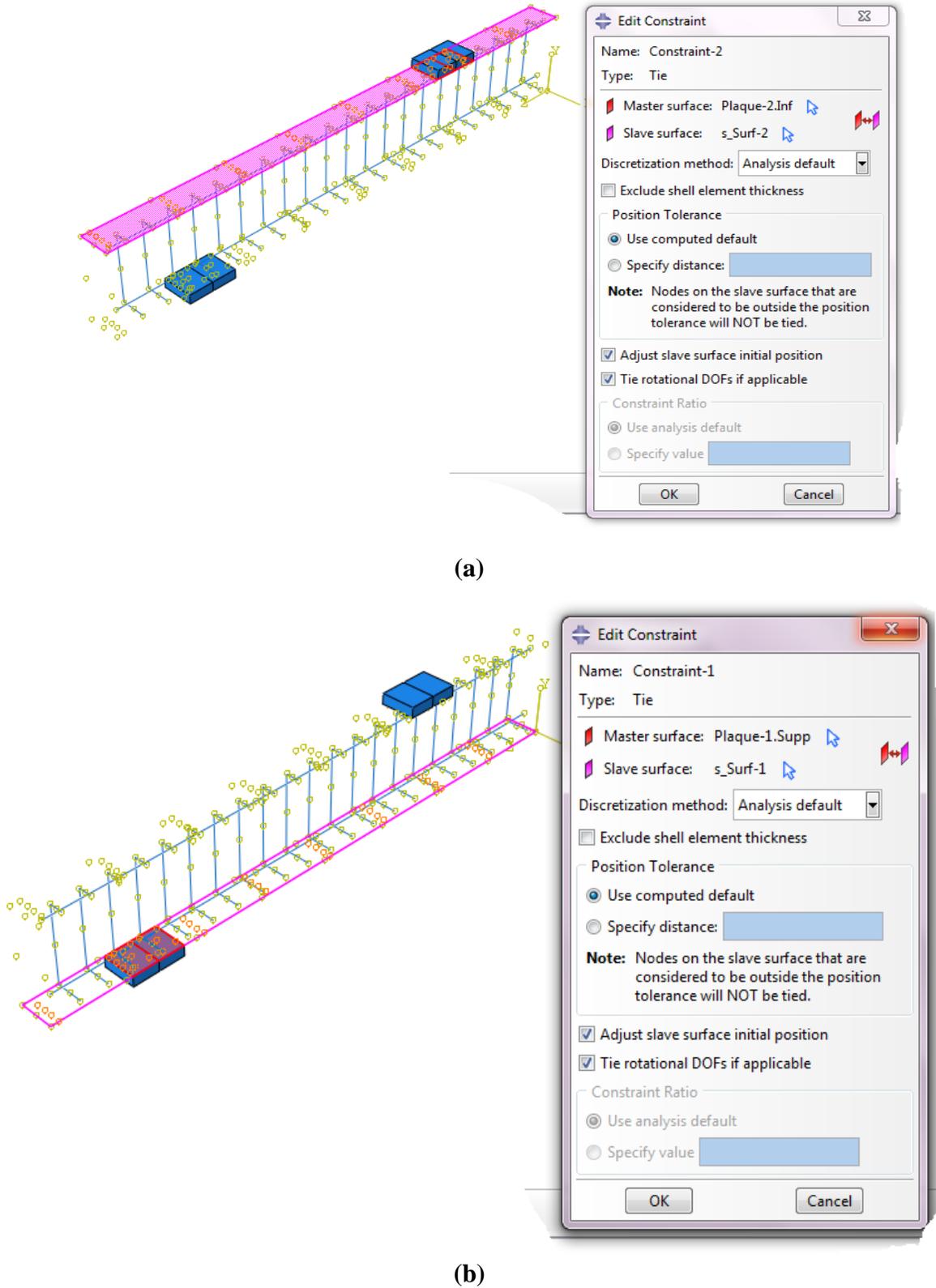


Figure IV.6 Edite l'interaction de contact; a) Master Slave et b) Master Slave plaque 1

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

### 4.4.3 Les conditions aux limites :

Nous présentons dans ce paragraphe les différentes conditions aux limites concernant le modèle d'étude voir la figure 4.3.

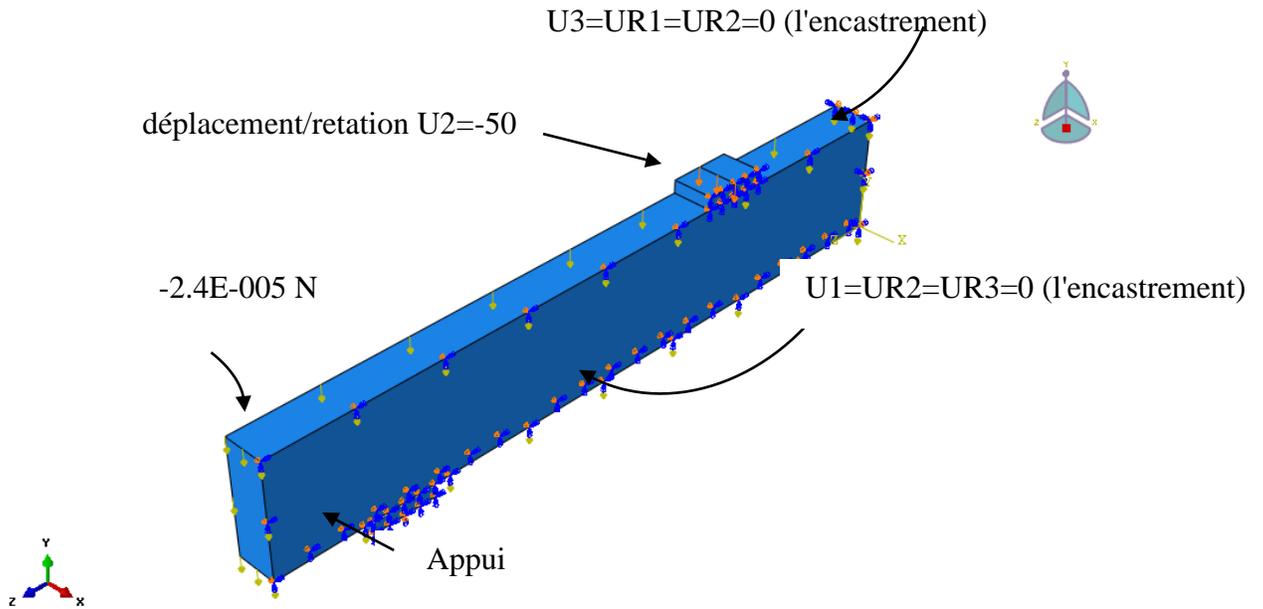
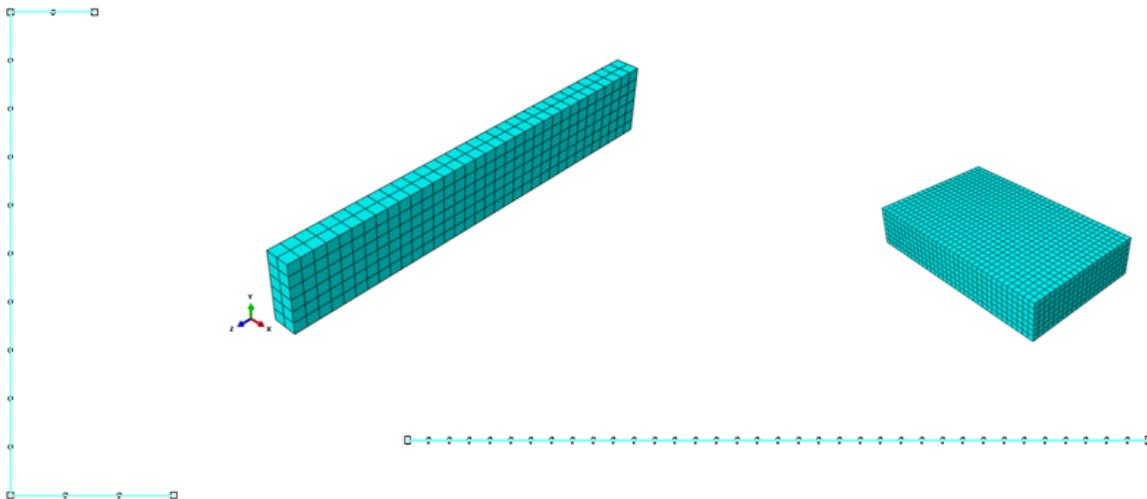


Figure IV.7 illustration des différentes conditions aux limites

### 4.4.4 Le maillage :



# CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

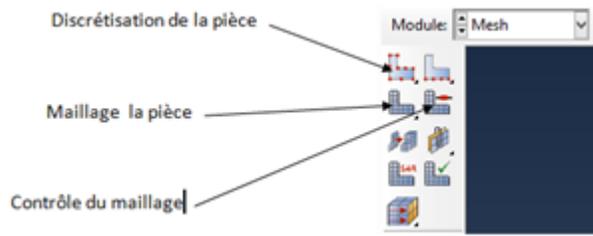
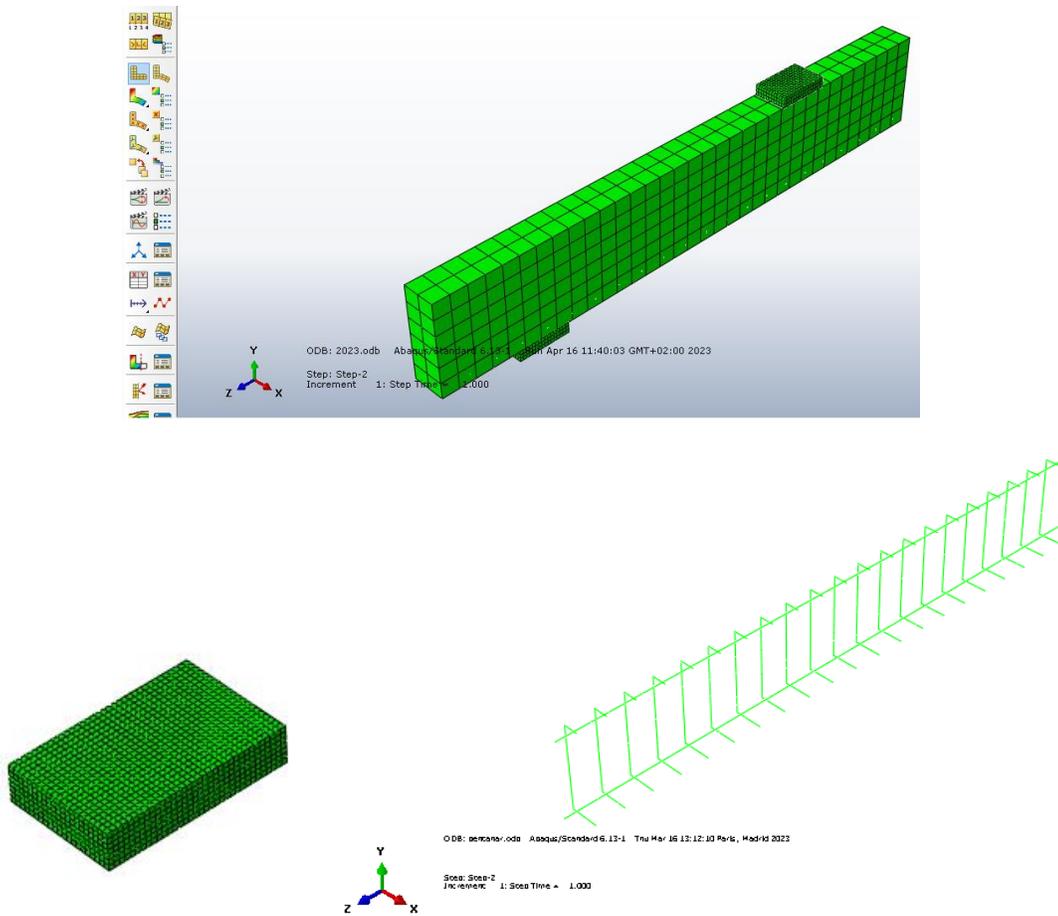


Figure IV.9 Modèle FEM (maillage)

## 4.4.5 Modélisation Numérique :



La figure IV .10 : Modèle numérique

# CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

## 4.5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS :

### 4.5.1 Modélisation de déplacement :

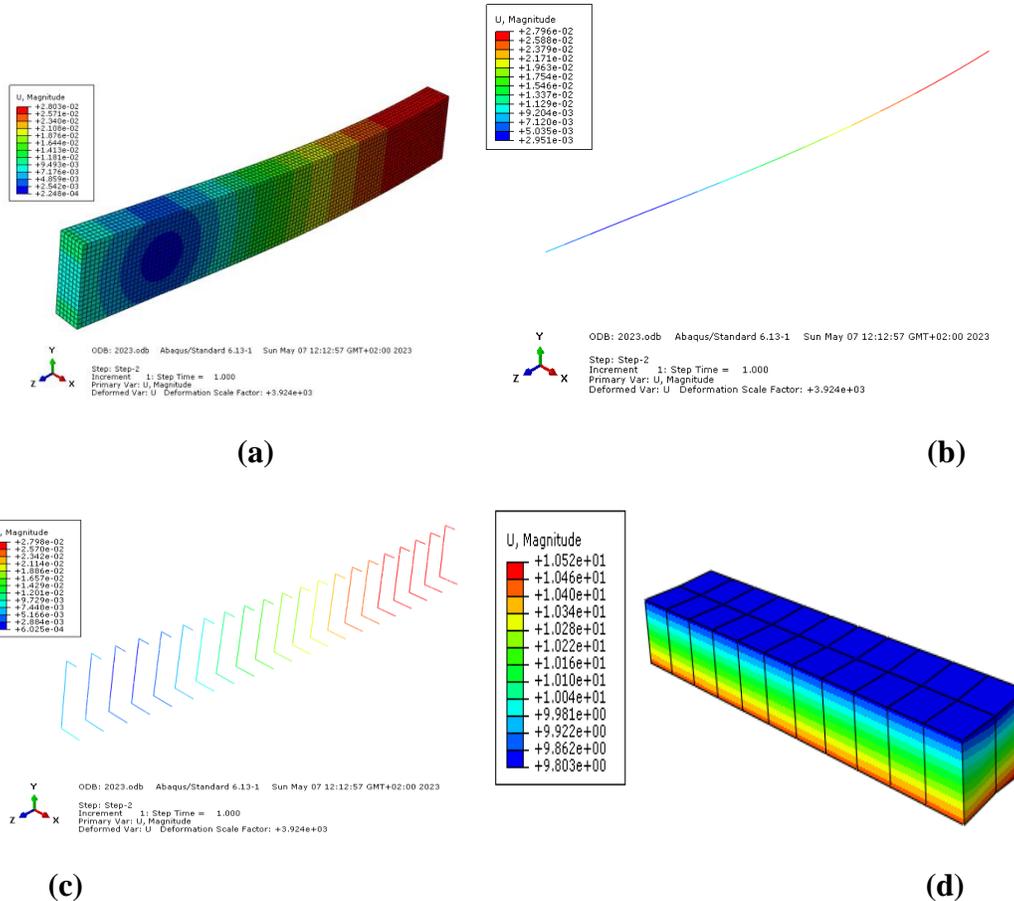


Figure IV.11 : Modélisation de déplacement de différents éléments; a) poutre, b) armature, c) treilles et d) plaque

# CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

## 4.5.2 Modélisation de la contrainte :

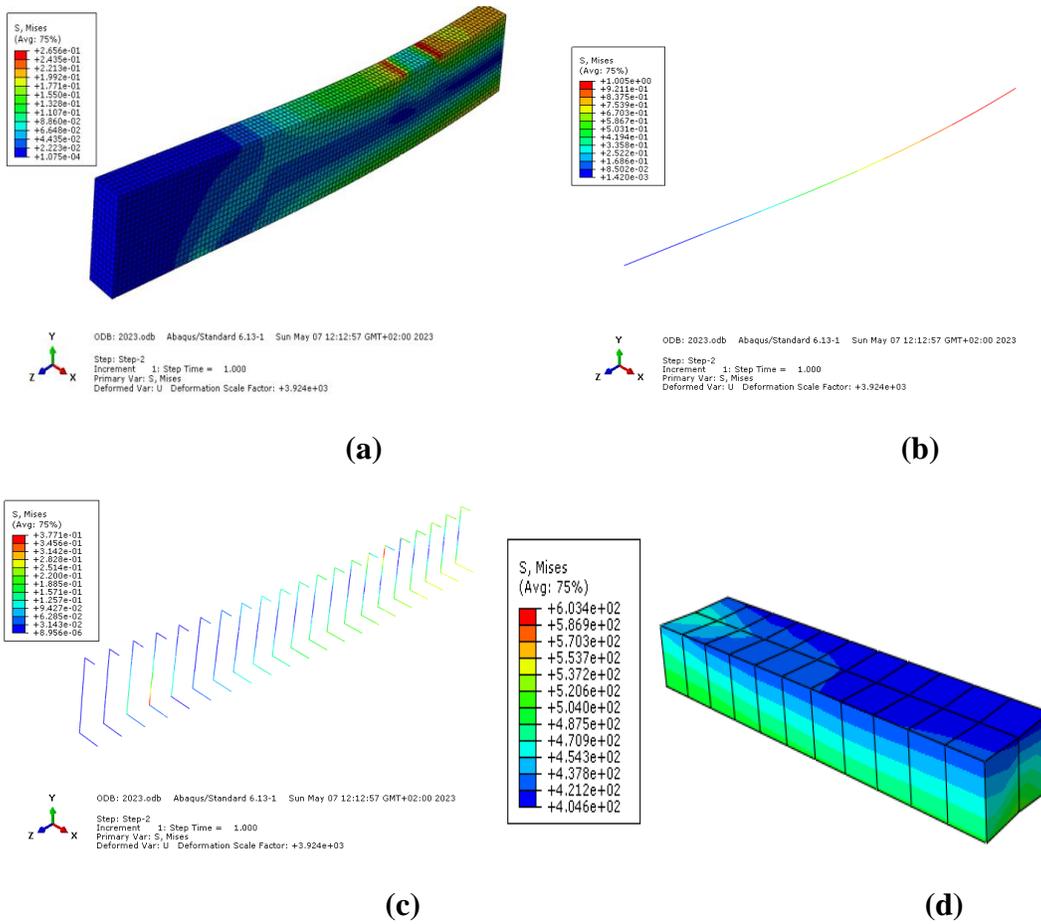


Figure IV .12 : Modélisation de la contrainte de différents éléments; a) poutre, b) armature, c) treilles et d) plaque

# CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

## 4.5.3 Modélisation de déformation :

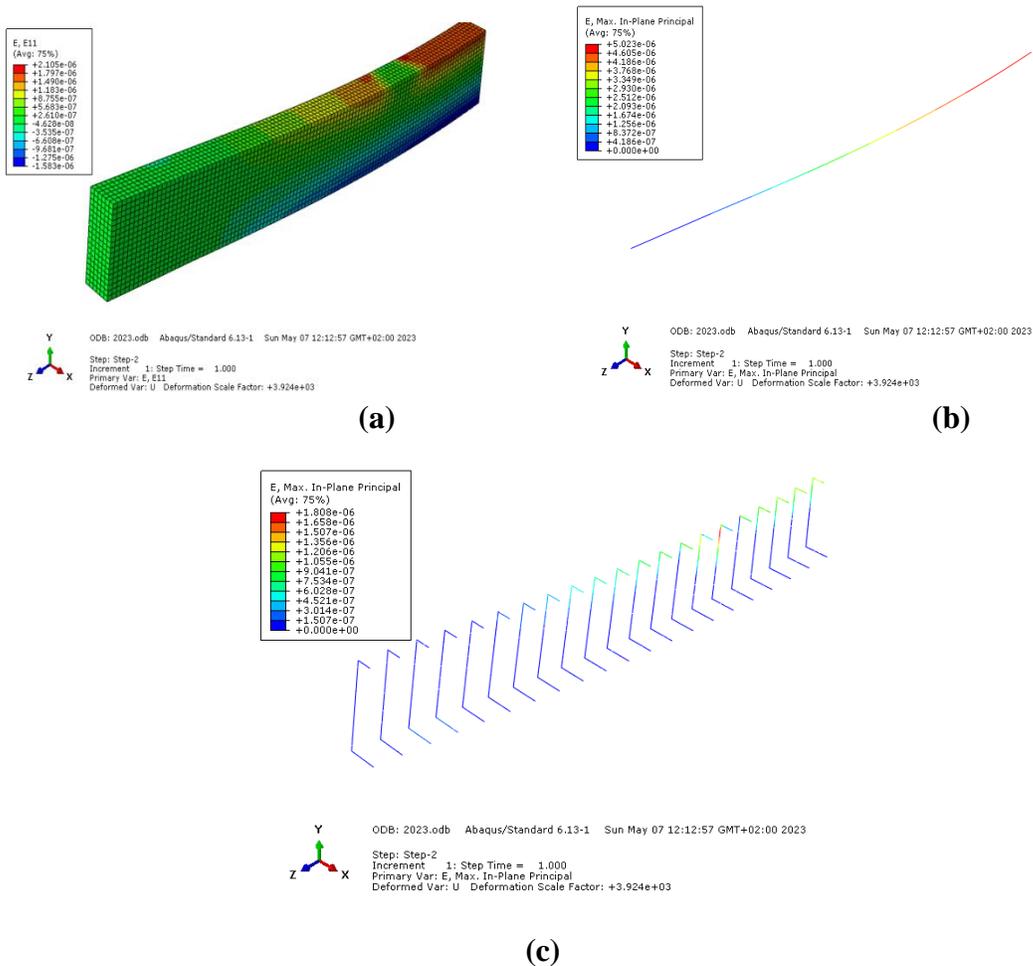


Figure IV .13 : Modélisation de la déformation de différents éléments; a) poutre, b)armature et c) treilles

# CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

## 4.5.4 Modélisation de la réaction de force :

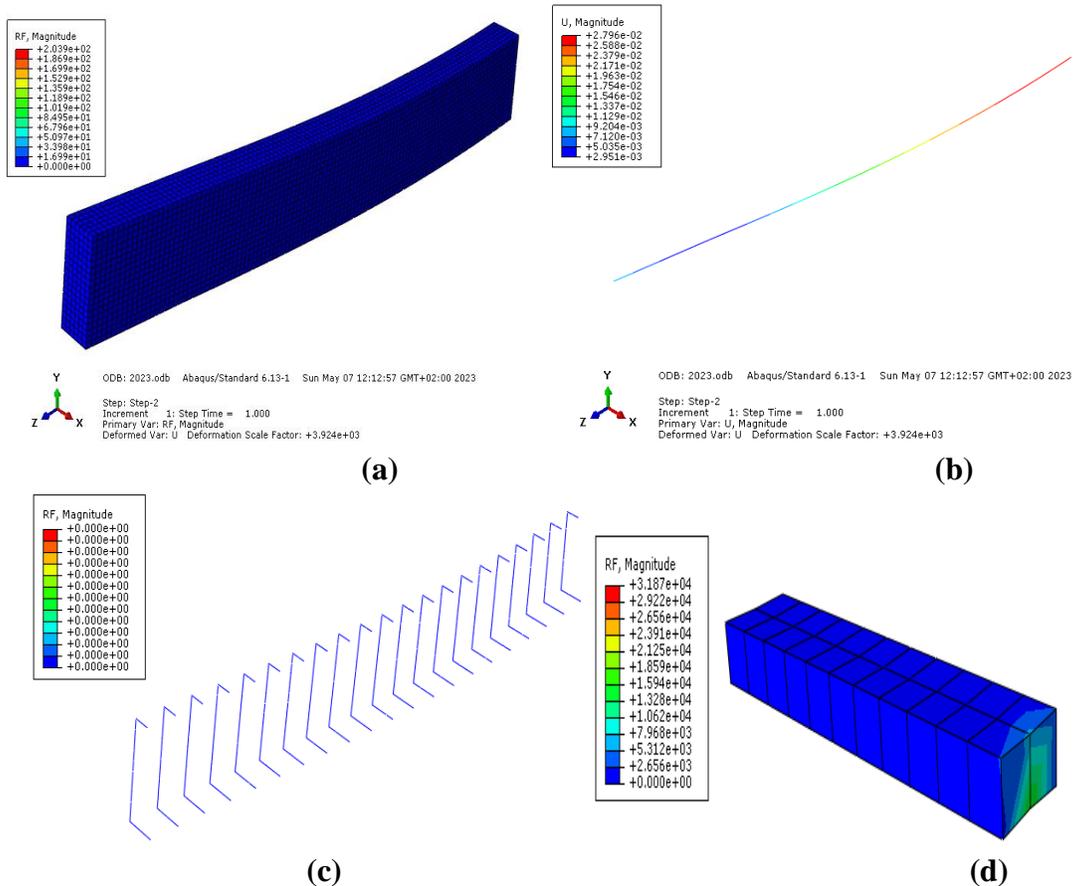


Figure IV.14 : Modélisation de la réaction de force de différents éléments; a) poutre, b) armature, c) treilles et d) plaque

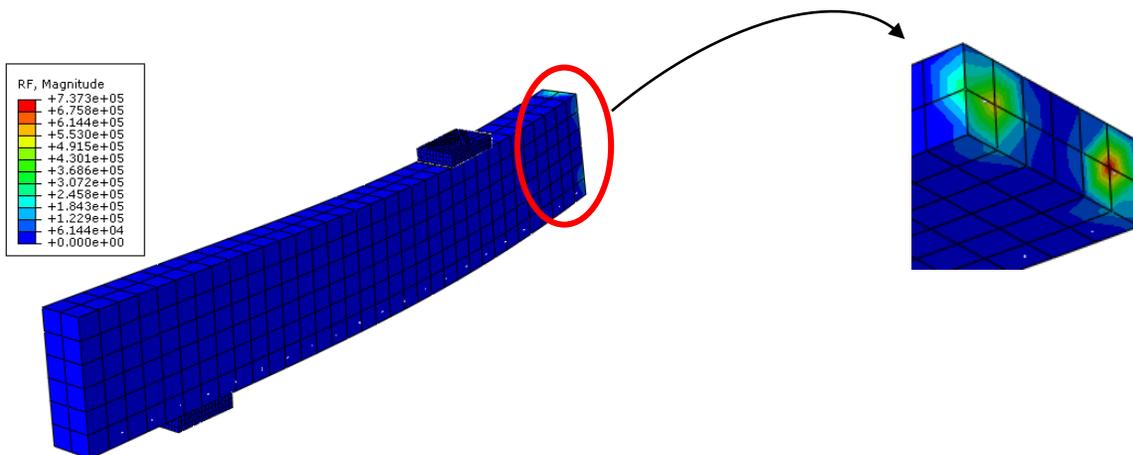
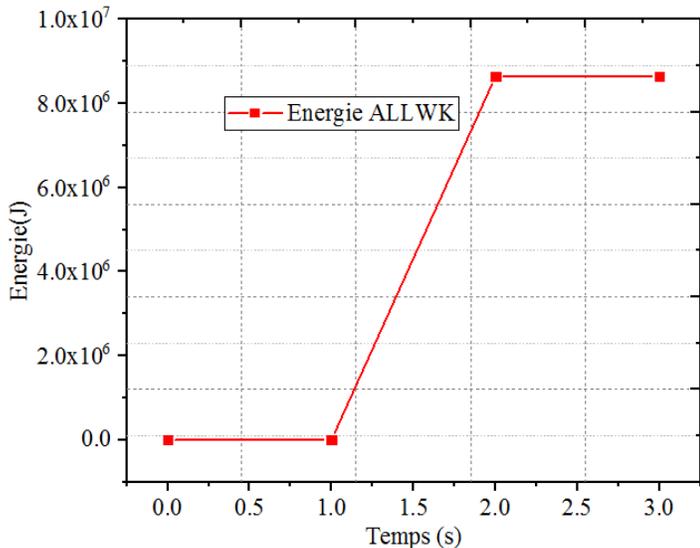


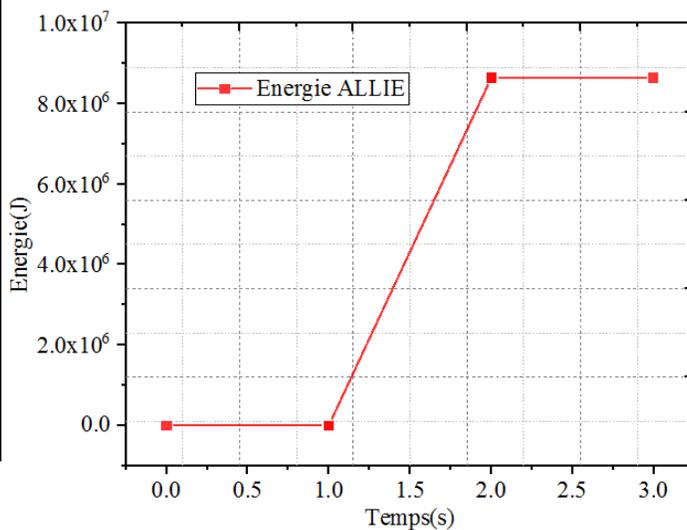
Figure IV.15 Modélisation de la réaction de force du modèle assemblé

## 4.6 LES VARIABLES :

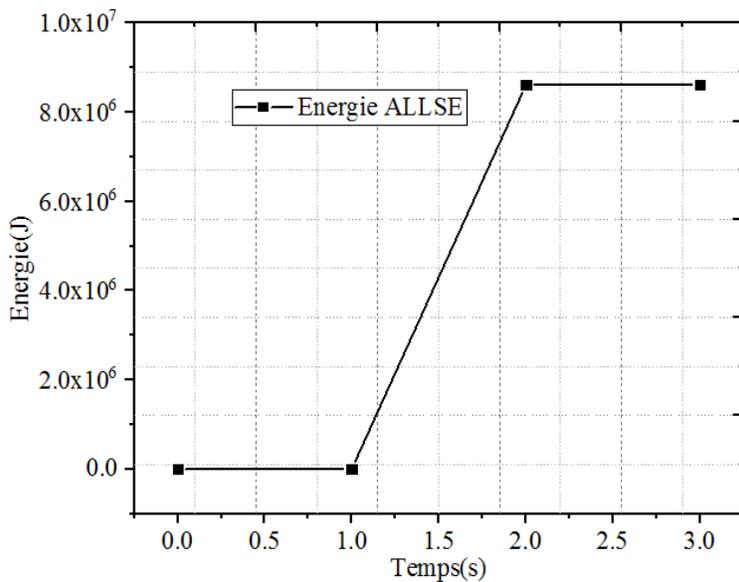
### 4.6.1 Variation de l'énergie



(a)



(b)



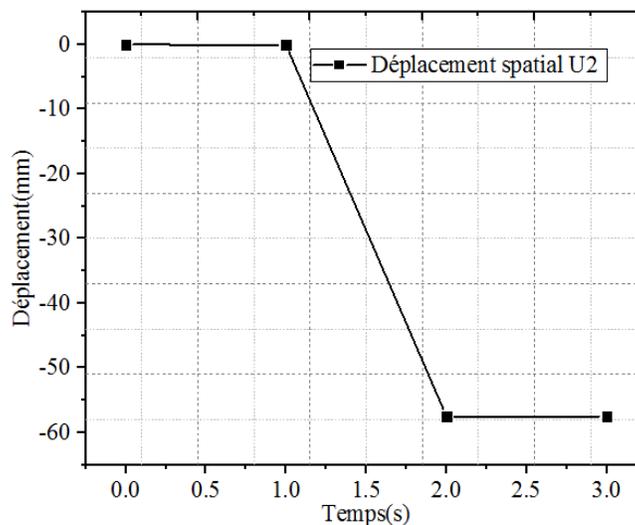
(c)

Figure IV. 14 Variation de l'énergie en fonction du temps; a) travail externe, b) l'énergie interne et c) l'énergie de déformation

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

La figure 4.14 montre la variation de l'énergie en fonction du temps, **la figure (IV.14a)** présente L'énergie(ALLWK), **la figure (IV.14b)** présente l'énergie (ALLIE) et **la figure( IV .14c)** présente l'énergie (ALLSE), en peut dire que les résultats est nulle dans l'intervalle du temps de [0.1]. Après le temps de 1s les différentes énergies sont commences a augmentent jusqu'à la valeur  $8.9 \times 10^6$ J. En outre, d'après cette valeur les trois énergies est reste stable jusqu'à le temps  $t=3$ s. on peut remarquer que les trois énergies varient en trois temps le premier de 0 à 1s et le second temps de 1 à 2s et le troisièmes de 2 à 3s .Les résultats obtenues dan d'après cette modélisation justifie que la forme de cet diagramme prennent la forme de diagramme contrainte-déformation.

### 4.6.2 Variation du déplacement :



**Figure IV. 15**Déplacement spatial U2 : Poutre Nœud 497 dans NSET Flèche

**La figure IV.15** montre la variation de déplacement en fonction du temps, cette explique le déplacement spatial U2 de la poutre concernant le nœud 497 dans NSET Flèche.

En peut observer l'état de déplacement de la poutre est inverse par rapport à la variation de l'énergie, que l'énergie est nulle dans l'intervalle [0.1] s. Après le point 1s déplacement va commencer à réduire jusqu'à -58mm. Il y'a une inversement des résultats par rapport a la variation des énergies en fonction du temps. Dans l'intervalle du temps de [1.2]s ,plus le temps augmente plus le déplacement est diminué.

## CHAPITRE 4: modélisation numérique de comportement de poutres

### 4.6.3 Variation de la force (RF) :

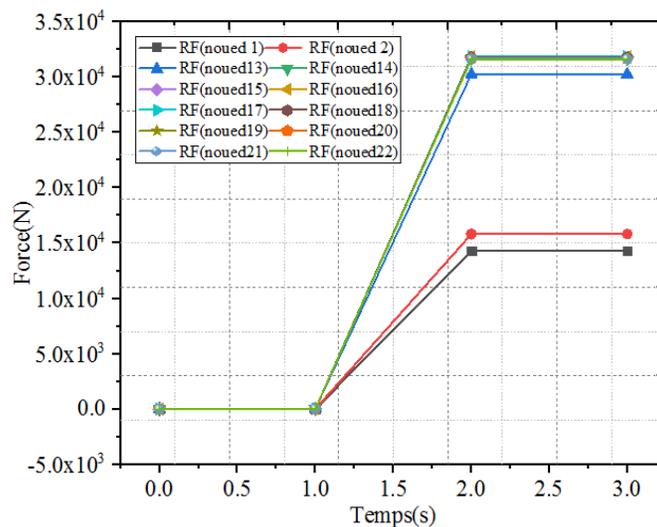


Figure IV.16 La variation de la force en fonction du temps

La figure IV.16 montre la variation de la force en fonction du temps, la variation de cette comparaison est concentrée plus précisément sur les nœuds 1, 2, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21 et le nœud 22, on peut voir que les résultats obtenus sont proportionnelles, d'autre part plus le nombre de nœuds augmente plus la force augmente, ainsi l'augmentation du temps provoque une augmentation de la force, en outre l'intervalle du temps de l'augmentation est pris entre 1et 2s.

### CONCLUSION :

Le chapitre 4 présente les différentes modélisations sur les éléments du modèle.

Le maillage de notre modèle a été défini correctement pour faire la modélisation, afin d'extraire des résultats .En outre, les différents phénomènes comme la contrainte, la déformation, le déplacement et la réaction de force (RF) ont été modélisés par la méthode éléments fins FEM en trois dimensions concernant une poutre à des comportements linéaire. D'autre part, les résultats obtenus dans ce chapitre ont été expliqués et discuter.

# ***CONCLUSION GÉNÉRALE***



## CONCLUSION GENERALE

---

### CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objet de ce mémoire a été la modélisation du comportement linéaire de poutre en trois dimensions. Une étude bibliographique nous a permis de donner des aspects généraux concernant la modélisation du comportement linéaire des poutres, tels que les aspects généraux sur les comportements des poutres, l'étude générale sur les comportements des poutres en flexion et les notions générales concernant le béton armé.

D'autre part, les différentes énergies telles que l'énergie interne ALLIE, l'énergie de déformation ALLSE, l'énergie de travail extérieur, le déplacement et la force de réaction de la poutre en béton armé de comportement linéaire ont été évaluées par la méthode des éléments finis (FEM) d'un modèle (3D).

Tout d'abord, les éléments (C3D8R) et les éléments T3D2 ont été utilisés pour faire la modélisation de la poutre, plaques, armatures et les treilles respectivement.

# **RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**



# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] BOUCHAREB MOHAMED NACER Analyse modale d'une poutre encastré-libre MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER Année: 2016/2017 UNIVERSITY-ANNABA MOKHTAR BADJI UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA DIRECTEUR DU MEMOIRE :DR. RAMDANE YOUNES
- [2] Anders Thorin, Gilles Foret: Calcul des structures : Introduction au calcul de structures élastiques linéaires. Ecole d'ingénieur. (MEC441) MODAL - Génie Civil, Palaiseau, France.
- [3] PolycoPié de cours RESISTANCE DES MATERIAUX-2 Présenté par Dr. M. HADJ MILOUD UNIVERSITE HASSIBA BENBOUALI DE CHLEF Faculté de Technologie Département de Génie-Mécanique Année 2018/2019
- [4] CHAP.III INTRODUCTION A LA RESISTANCE DES MATERIAUX Source: [www.almohandiss.com](http://www.almohandiss.com)
- [5] FACULTE DES SCIENCES EXACTES DEPARTEMENT MATERIAUX ET DEVELOPPEMENT DURABLE THESE DE DOCTORAT Filière : Physiques Spécialité : Physique Energétique et sciences des Matériaux Sujet de thèse Etude des propriétés Physique des nanostructures fabriquées à partir des mélanges Céramique -métal. Présenté par : Mr BENAHMED Abdelillah Année universitaire 2019-2020
- [6] Analyse du comportement mécanique d'une poutre sandwich en matériaux composites anisotropes sous chargement statique réalisé et présenté par Ir. AMADJI Damien Paul /UAC/2016-2017
- [7] Najet BENAMARA & Ali MOUSSAOUI Cours de Resistance Des Matériaux 2 A.U: 2013/2014 Révision : 2018/2019, Direction Générale des Etudes Technologiques Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Gafsa Département de Génie Civil.
- [8] POLYCOPIE Cours et exercices Elaboré par : Mr. Mohammed CHAIB Année universitaire 2018/2019 Résistance des Matériaux Université Ahmed Ben Bella Oran 1 Institut Des Sciences Et Techniques Appliquées.
- [9] Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf Faculté de Génie Mécanique Département de Génie Maritime SUPPORT DE COURS EN RESISTANCE DES MATERIAUX ELABORE PAR : Dr. HADJAZI Khamis

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [10] cours pdf charges permanentes et charges d'exploitation .[https:// btp-cours.com](https://btp-cours.com).
- [11] cours de résistance des matériaux 2 Najet BENAMARA & ALI MOUSSAOUI .A.U 2013/2014
- [12] chapitre 01 ,Eurocode 1 : action on structures –part 2-2 trafficloads on Bridges
- [13] Normes et codes pratique .Eurocode en 1991-1-4 : action on structures- part 1-4 : general action – Wind Action .
- [14] Sites Web d'organismes professionnels et universitaires :  
American society of civil Engineers (ASCE) :[www.asce.org](http://www.asce.org)  
International Association for Wind Engineering (IAWE): [www.iawe.org](http://www.iawe.org)  
ResearchGate:[www.researchgate.net](http://www.researchgate.net)
- [15] cours de RDM première année école d'ingénieur ESITC. [https://RDM estp-Voila.net/poly/ tp1-cour.pdf](https://RDM.estp-Voila.net/poly/tp1-cour.pdf)
- [16] chapitre 1 Introduction à la résistance des matériaux /A.U2012.2013
- [17] cours RDM Systèmes Isostatiques SOUAD MALAB docteur en génie civil université des sciences et de la technologie d' oran Mohammed Boudiaf USTOMB.
- [18] <https://fr.m.wikipedia.org> Théorie des poutres.
- [19] cours de la méthode des éléments finis Docteur KHEBIZI MOURAD. Université des frères Mentouri Constantine Faculté des sciences de la Technologie département de génie civil .Année universitaire 2019-2020 aux étudiants de Master géotechnique.
- [20] cours la méthode des éléments finis calcul non linéaire matériel. Alaachateaneuf ,10 MAI 2018.
- [21] cour RDM . Dr Djamel Ouzandja. Université Mohammed Boudiaf de Msila.
- [22] cour de Résistance des matériaux chapitre-6- Flexion simple PDF.
- [23] Lycée du Pays de Soule BTS C.I.M. Construction Mécanique –RDM  
[https://www.lyceedupaysdessoule.fr/micritec/construction/cours/ch6\\_rdm.pdf](https://www.lyceedupaysdessoule.fr/micritec/construction/cours/ch6_rdm.pdf).
- [24] Résistance Des Matériaux (RDM) LA FLEXION\_COURS\_sti2d.pdf  
[https://tribu.phm.education.gouv.fr/toutail-portail-cms-nuxeo/binary/FLEXION\\_COURS\\_sti2d.pdf?](https://tribu.phm.education.gouv.fr/toutail-portail-cms-nuxeo/binary/FLEXION_COURS_sti2d.pdf?)
- [25] COURS DE RDM PROPRIÉTÉ GONNET\_2003 PAGE 13 SUR 21 université Bourgogne  
<https://www.fichier-pdf.fr/2016/03/11/flexionsimple>.
- [26] T.G.C. Mécanique Contrainte normale due à la flexion simple,  
<https://liegeniecivil.wifeo.com/documents/cours-contrainte-due--la-flexion-simple.pdf>
- [27] Dr. YAHIA L RESUME COURS RDM /2ème année/ Socle Commun Sciences et Technologie\_ université Batna2.
- [28] Dr BELHADJ A.F Etude des sollicitations (flexion) Université Ferhat Abbas sétif 1.
- [29] Département Maintenance Industrielle SUPPORT DE COURS EN RESISTANCE DES MATERIAUX ISET MAHDIA Résistance des matériaux 2006-2007  
<File:///C:/Users/PC/Downloads/55302e115909b.pdf>
- [30] Cours – Td- Tp Résistance Des Matériaux ensi-ensci école d'ingénieurs de Limoges université e limoges [https://www.unilim.fr/pages\\_peso/damien.andre/cours/meca/poly.pdf](https://www.unilim.fr/pages_peso/damien.andre/cours/meca/poly.pdf)

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [31] étude d'un bâtiment R+9 à usage d'habitation-contreventement mixte implanté à AIN DEFLA\_A.U.
- [32] cours de béton armé –professeur Reda yeghnem.
- [33] cours béton armé principe de base et dimensionnement licence sciences technologie santé mention physique et ingénieries licence3 –jacqueline.Saliba.[@-bordeaux.fr](mailto:jacqueline.Saliba@bordeaux.fr).
- [34] Serviceability limit-state Design Published online by cambridge University press : 17 september 2009.
- [35] cours béton armé-licence travaux publics –faculté d'architecture et de génie civil – D Taibi Houria et Ainaï- Université d'Oran Mohamed Boudiaf.
- [36] cours béton armé \_Dr.MADI Rafik septembre 2014.
- [37] DTR6BC2 Règles de conception et de calcul des structures en béton armé (CBA93).
- [38] cours béton armé TEC 185 Mr BARAKA Abdelhak –centre universitaire de Béchar département de génie civil et d'architecture A.U 2005/2006.
- [39] cours fissuration en béton avec référence particulière au béton à haut performance.par Touhami TAHENNI USTHB ,algerie –magister en génie civil 2006.
- [40] cours les matériaux de béton armé gerald-hivin@ujf-grenoble.fr.
- [41] Chap2 Matériaux du béton armé 13 [gerald.hivin@ujf-grenoble.fr](mailto:gerald.hivin@ujf-grenoble.fr).
- [42] Introduction à ABAQUS , Ignacio Romero ETSI Industrials, Universidad Politecnica de Madrid.

### REFERENSES SITIOGRAPHIQUES :

<https://docplayer.es/94368786-Introduccion-a-abaqus.html>

<https://docplayer.fr/25020130-Introduction-a-abaqus.html>

[https://btp-cours.com/notions-detats-limites/#Etats\\_limites\\_ultimes\\_ELU](https://btp-cours.com/notions-detats-limites/#Etats_limites_ultimes_ELU)

# ***ANNEXE***



# ANNEXE

## A

Abaqus 6.13-1 Date 16-mars-2023 Time 13:12:10  
For use by under license from DassaultSystemes or its subsidiary.

The Abaqus Software is a product of:  
DassaultSystemesSimulia Corp.  
Rising Sun Mills  
166 Valley Street  
Providence, RI 02909-2499, USA

The Abaqus Software is available only under license  
fromDassaultSystemes or its subsidiary and may be  
used or reproduced only in accordance with the terms  
of such license.

On machine BENTAHAR-PC  
you are authorized to run  
Abaqus/Standard until 31-Dec-2055

Your site id is:

For assistance or any other information you may  
obtain contact information for your local office  
from the world wide web at:

<http://www.3ds.com/products/simulia/locations/>

```
*****
*
*
*      *****
*      * NOTICE *
*      *****
*
*
*      Abaqus 6.13-1
*
*      BUILD ID: 2013_05_16-04.28.56 126354
*
*
*****
```

\* Please make sure you are using release 6.13 manuals \*  
\* plus the notes accompanying this release. \*

```
*
*
*
*
*****
```

PROCESSING PART, INSTANCE, AND ASSEMBLY INFORMATION

\*\*\*\*\*

END PROCESSING PART, INSTANCE, AND ASSEMBLY INFORMATION

\*\*\*\*\*

OPTIONS BEING PROCESSED

\*\*\*\*\*

```
*Heading
*Node
*Element, type=C3D8R
*Nset, nset=ASSEMBLY_POUTRE-1_BÉTON
*Nset, nset=ASSEMBLY_POUTRE-1_FLÈCHE
*Nset, nset=ASSEMBLY_POUTRE-1_SET-3
*Elset, elset=ASSEMBLY_POUTRE-1_BÉTON
*Elset, elset=ASSEMBLY_POUTRE-1_SET-3
```

## ANNEXE

```
*Elset, elset=ASSEMBLY_POUTRE-1__LONG_S1
*Elset, elset=ASSEMBLY_POUTRE-1__TRANS_S3
*Node
*Element, type=C3D8R
*Nset, nset=ASSEMBLY_PLAQUE-1_APPUI
*Nset, nset=ASSEMBLY_PLAQUE-1_LOAD
*Nset, nset=ASSEMBLY_PLAQUE-1_SET-3
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-1_APPUI
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-1_LOAD
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-1_SET-3
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-1__INF_S2
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-1__INF_S6
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-1__SUPP_S1
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-1__SUPP_S4
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=ASSEMBLY_ETTIER-1_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1_SET-1
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset="ASSEMBLY_Arm sup-1_SET-1"
*Elset, elset="ASSEMBLY_Arm sup-1_SET-1"
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset="ASSEMBLY_Arm inf-1_SET-1"
*Elset, elset="ASSEMBLY_Arm inf-1_SET-1"
*Node
*Element, type=C3D8R
*Nset, nset=ASSEMBLY_PLAQUE-2_APPUI
*Nset, nset=ASSEMBLY_PLAQUE-2_LOAD
*Nset, nset=ASSEMBLY_PLAQUE-2_SET-3
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-2_APPUI
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-2_LOAD
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-2_SET-3
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-2__INF_S2
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-2__INF_S6
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-2__SUPP_S1
*Elset, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-2__SUPP_S4
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-2_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-2_SET-1
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-3_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-3_SET-1
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-4_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-4_SET-1
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-5_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-5_SET-1
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-6_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-6_SET-1
*Node
*Element, type=T3D2
*Nset, nset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-7_SET-1
*Elset, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-7_SET-1
```

# ANNEXE

\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-8\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-8\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-9\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-9\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-10\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-10\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-11\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-11\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-12\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-12\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-13\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-13\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-14\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-14\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-15\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-15\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-16\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-16\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-17\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-17\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-18\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-18\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-19\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-19\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-20\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-20\_SET-1  
\*Node  
\*Element, type=T3D2  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-21\_SET-1  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-21\_SET-1  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_ARMATURES  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_LONG  
\*Nset, nset=ASSEMBLY\_TRANS  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_ARMATURES  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_LONG  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_TRANS

# ANNEXE

\*Elset, elset=ASSEMBLY\_\_S\_SURF-1\_S4  
\*Elset, elset=ASSEMBLY\_\_S\_SURF-2\_S6  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-1, adjust=YES  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-2, adjust=YES  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_LONG  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_TRANS  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_INF  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_SUPP  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_S\_SURF-1  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_S\_SURF-2  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-1, adjust=YES  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-2, adjust=YES  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_LONG  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_TRANS  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_INF  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_SUPP  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_S\_SURF-1  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_S\_SURF-2  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_LONG  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_TRANS  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_INF  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_SUPP  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_S\_SURF-1  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_S\_SURF-2  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-1, adjust=YES  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-2, adjust=YES  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-1, adjust=YES  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-2, adjust=YES  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_SET-3, material="Bétonlineaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SET-3, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset="ASSEMBLY\_Arm sup-1\_SET-1", material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset="ASSEMBLY\_Arm inf-1\_SET-1", material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_SET-3, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-2\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-3\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-4\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-5\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-6\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-7\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-8\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-9\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-10\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-11\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-12\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-13\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-14\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-15\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-16\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-17\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-18\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-19\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-20\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-21\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*material, name="Acierlinéaire"  
\*density

## ANNEXE

```
*elastic
*material, name="Acier non linéaireArma"
*density
*elastic
*plastic
*material, name="Acier non linéaire-etrier"
*density
*elastic
*plastic
*material, name="Bétonlineaire"
*density
*elastic
*material, name="Beton non linéaire 1"
*density
*depvar, delete=31
*usermaterial, constants=61
*solidsection, elset=ASSEMBLY_POUTRE-1_SET-3, material="Bétonlineaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-1_SET-3, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset="ASSEMBLY_Arm sup-1_SET-1", material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset="ASSEMBLY_Arm inf-1_SET-1", material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_PLAQUE-2_SET-3, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-2_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-3_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-4_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-5_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-6_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-7_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-8_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-9_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-10_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-11_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-12_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-13_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-14_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-15_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-16_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-17_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-18_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-19_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-20_SET-1, material="Acierlinéaire"
*solidsection, elset=ASSEMBLY_ETTIER-1-LIN-1-21_SET-1, material="Acierlinéaire"
*embeddedelement, hostelset=ASSEMBLY_POUTRE-1_BÉTON
*embeddedelement, hostelset=ASSEMBLY_POUTRE-1_BÉTON
*embeddedelement, hostelset=ASSEMBLY_POUTRE-1_BÉTON
*boundary
*boundary
*boundary
*tie, name=ASSEMBLY_CONSTRAINT-1, adjust=YES

***WARNING: PLEASE MAKE SURE THAT THE MESH DENSITY OF THE SLAVE SURFACE IN THE
TIE PAIR (ASSEMBLY_S_SURF-1.ASSEMBLY_PLAQUE-1_SUPP) IS FINER THAN
THE MASTER SURFACE. THE ANALYSIS MAY RUN SLOWER, MAY YIELD
INACCURATE RESULTS, AND MAY REQUIRE MORE MEMORY IF THIS IS NOT THE
CASE.

***WARNING: FOR *TIE PAIR (ASSEMBLY_S_SURF-1-ASSEMBLY_PLAQUE-1_SUPP), ADJUSTED
NODES WITH VERY SMALL ADJUSTMENTS WERE NOT PRINTED. SPECIFY
*PREPRINT,MODEL=YES FOR COMPLETE PRINTOUT.
*tie, name=ASSEMBLY_CONSTRAINT-2, adjust=YES

***WARNING: PLEASE MAKE SURE THAT THE MESH DENSITY OF THE SLAVE SURFACE IN THE
```

## ANNEXE

TIE PAIR (ASSEMBLY\_S\_SURF-2,ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF) IS FINER THAN THE MASTER SURFACE. THE ANALYSIS MAY RUN SLOWER, MAY YIELD INACCURATE RESULTS, AND MAY REQUIRE MORE MEMORY IF THIS IS NOT THE CASE.

\*\*\*WARNING: FOR \*TIE PAIR (ASSEMBLY\_S\_SURF-2-ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF), ADJUSTED NODES WITH VERY SMALL ADJUSTMENTS WERE NOT PRINTED. SPECIFY \*PREPRINT,MODEL=YES FOR COMPLETE PRINTOUT.

\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-1, adjust=YES

\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-2, adjust=YES

\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-1, adjust=YES

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 7 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 14 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 21 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 28 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 35 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 42 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 49 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 56 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 63 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 70 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 77 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*NOTE: THE ABOVE WARNING MESSAGE IS BEING SUPPRESSED DUE TO EXCESSIVE REPORTING.

\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-2, adjust=YES

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 1 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 8 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 15 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 22 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 29 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

## ANNEXE

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 36 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 43 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 50 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 85 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 92 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*WARNING: SLAVE NODE 99 INSTANCE POUTRE-1 WILL NOT BE TIED TO THE MASTER SURFACE ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF. THE DISTANCE FROM THE MASTER SURFACE IS GREATER THAN THE POSITION TOLERANCE VALUE.

\*\*\*NOTE: THE ABOVE WARNING MESSAGE IS BEING SUPPRESSED DUE TO EXCESSIVE REPORTING.

\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_SET-3, material="Bétonlineaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SET-3, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset="ASSEMBLY\_Arm sup-1\_SET-1", material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset="ASSEMBLY\_Arm inf-1\_SET-1", material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_SET-3, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-2\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-3\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-4\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-5\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-6\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-7\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-8\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-9\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-10\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-11\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-12\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-13\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-14\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-15\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-16\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-17\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-18\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-19\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-20\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*solidsection, elset=ASSEMBLY\_ETTIER-1-LIN-1-21\_SET-1, material="Acierlinéaire"  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_LONG  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_TRANS  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_INF  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_SUPP  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_INF  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_PLAQUE-2\_SUPP  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_S\_SURF-1  
\*surface, type=ELEMENT, name=ASSEMBLY\_S\_SURF-2  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-1, adjust=YES  
\*tie, name=ASSEMBLY\_CONSTRAINT-2, adjust=YES  
\*embeddelement, hostelset=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_BÉTON  
\*output, field  
\*output, history  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*output, field  
\*output, history

## ANNEXE

\*output, history, variable=PRESELECT  
\*elementoutput, directions=YES  
\*elementoutput, directions=YES  
\*output, field  
\*output, history  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*output, field  
\*output, history  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*elementoutput, directions=YES  
\*elementoutput, directions=YES

\*\*\*WARNING: 186 nodes are either missing intersection with their respective master surface or are outside the adjust zone. The nodes have been identified in node set WarnNodeMissMasterIntersect.

\*output, field  
\*output, history  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*output, field  
\*output, history  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*elementoutput, directions=YES  
\*elementoutput, directions=YES  
\*amplitude, name=AMP-1, definition=SMOOTHSTEP  
\*Step, name=Step-1, nlgeom=NO  
\*output, field  
\*output, history  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*Step, name=Step-2, nlgeom=NO  
\*output, field  
\*output, history  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*Step, name=Step-1, nlgeom=NO  
\*Step, name=Step-2, nlgeom=NO  
\*Step, name=Step-1, nlgeom=NO  
\*static  
\*dload  
\*output, field  
\*nodeoutput  
\*elementoutput, directions=YES  
\*contactoutput  
\*output, history  
\*nodeoutput, nset=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_APPUI  
\*nodeoutput, nset=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_FLÈCHE  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*endstep

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE C3D8R

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE C3D8R

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT



## ANNEXE

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2  
\*Step, name=Step-2, nlgeom=NO  
\*static  
\*boundary  
\*dload, amplitude=AMP-1  
\*output, field  
\*nodeoutput  
\*elementoutput, directions=YES  
\*contactoutput  
\*output, history  
\*nodeoutput, nset=ASSEMBLY\_PLAQUE-1\_APPUI  
\*nodeoutput, nset=ASSEMBLY\_POUTRE-1\_FLÈCHE  
\*output, history, variable=PRESELECT  
\*endstep  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE C3D8R  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE C3D8R  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE C3D8R  
\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.  
\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2



## ANNEXE

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*\*\*WARNING: STRAIN OUTPUT REQUEST LE IS NOT VALID FOR SOME ELEMENTS IN THIS ANALYSIS. THIS REQUEST IS SWITCHED TO THE STRAIN MEASURE, E.

\*\*\*WARNING: OUTPUT REQUEST TRIAX IS NOT AVAILABLE FOR THE MATERIAL FOR ELEMENT TYPE T3D2

\*boundary

\*boundary

\*boundary

\*Step, name=Step-1, nlgeom=NO

\*static

# ANNEXE

\*endstep  
\*Step, name=Step-2, nlgeom=NO  
\*static  
\*boundary  
\*endstep

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 3 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 37 INSTANCE Arm  
inf-1 BOUNDARY CONDITION TYPE ZSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 3 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 37 INSTANCE Arm  
sup-1 BOUNDARY CONDITION TYPE ZSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-10 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-11 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-12 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-13 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-14 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-15 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-16 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-17 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-18 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-19 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-2 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-20 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED

## ANNEXE

AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-21 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-3 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-4 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-5 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-6 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-7 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-8 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-9 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 547 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 554 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 561 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 568 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 679 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 686 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 693 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

## ANNEXE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 700 INSTANCE POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: 31 nodes have dof on which incorrect boundary conditions may have been specified. The nodes have been identified in node set WarnNodeBCIncorrectDof.

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 3 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 37 INSTANCE Arm inf-1 BOUNDARY CONDITION TYPE ZSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 3 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 37 INSTANCE Arm sup-1 BOUNDARY CONDITION TYPE ZSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-10 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-11 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-12 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-13 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-14 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-15 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-16 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-17 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-18 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-19 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE ETTIER-1-LIN-1-2 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS NODE

## ANNEXE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-20 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-21 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-3 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-4 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-5 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-6 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-7 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-8 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 1 INSTANCE  
ETTIER-1-LIN-1-9 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED  
AT THIS NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 547 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 554 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 561 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 568 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 679 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 686 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 693 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS

# ANNEXE

NODE

\*\*\*WARNING: DEGREE OF FREEDOM 1 HAS BEEN ELIMINATED AT NODE 700 INSTANCE  
POUTRE-1 BOUNDARY CONDITION TYPE XSYMM MAY NOT BE APPLIED AT THIS  
NODE

\*\*\*WARNING: 31 nodes have dof on which incorrect boundary conditions may have  
been specified. The nodes have been identified in node set  
WarnNodeBCIncorrectDof.

## PROBLEM SIZE

NUMBER OF ELEMENTS IS 1851  
NUMBER OF NODES IS 2777  
NUMBER OF NODES DEFINED BY THE USER 2777  
TOTAL NUMBER OF VARIABLES IN THE MODEL 8331  
(DEGREES OF FREEDOM PLUS MAX NO. OF ANY LAGRANGE MULTIPLIER  
VARIABLES. INCLUDE \*PRINT,SOLVE=YES TO GET THE ACTUAL NUMBER.)

END OF USER INPUT PROCESSING

## JOB TIME SUMMARY

USER TIME (SEC) = 0.50000  
SYSTEM TIME (SEC) = 0.10000  
TOTAL CPU TIME (SEC) = 0.60000  
WALLCLOCK TIME (SEC) = 1

1

Abaqus 6.13-1 Date 16-mars-2023 Time 13:12:29  
For use by under license from DassaultSystemes or its subsidiary.

STEP 1 INCREMENT 1  
TIME COMPLETED IN THIS STEP 0.00

## STEP 1 STATIC ANALYSIS

AUTOMATIC TIME CONTROL WITH -  
A SUGGESTED INITIAL TIME INCREMENT OF 1.00  
AND A TOTAL TIME PERIOD OF 1.00  
THE MINIMUM TIME INCREMENT ALLOWED IS 1.000E-05  
THE MAXIMUM TIME INCREMENT ALLOWED IS 1.00

LINEAR EQUATION SOLVER TYPE DIRECT SPARSE

## MEMORY ESTIMATE

PROCESS	FLOATING PT OPERATIONS PER ITERATION	MINIMUM MEMORY REQUIRED (MBYTES)	MEMORY TO MINIMIZE I/O (MBYTES)
1	1.04E+009	44	84

# ANNEXE

NOTE:

(1) SINCE ABAQUS DOES NOT PRE-ALLOCATE MEMORY AND ONLY ALLOCATES MEMORY AS NEEDED DURING THE ANALYSIS,

THE MEMORY REQUIREMENT PRINTED HERE CAN ONLY BE VIEWED AS A GENERAL GUIDELINE BASED ON THE BEST

KNOWLEDGE AVAILABLE AT THE BEGINNING OF A STEP BEFORE THE SOLUTION PROCESS HAS BEGUN.

(2) THE ESTIMATE IS NORMALLY UPDATED AT THE BEGINNING OF EVERY STEP. IT IS THE MAXIMUM VALUE OF THE

ESTIMATE FROM THE CURRENT STEP TO THE LAST STEP OF THE ANALYSIS, WITH UNSYMMETRIC SOLUTION TAKEN

INTO ACCOUNT IF APPLICABLE.

(3) SINCE THE ESTIMATE IS BASED ON THE ACTIVE DEGREES OF FREEDOM IN THE FIRST ITERATION OF THE CURRENT STEP, THE MEMORY ESTIMATE MIGHT BE SIGNIFICANTLY DIFFERENT THAN ACTUAL USAGE FOR

PROBLEMS WITH SUBSTANTIAL CHANGES IN ACTIVE DEGREES OF FREEDOM BETWEEN STEPS (OR EVEN WITHIN

THE SAME STEP). EXAMPLES ARE: PROBLEMS WITH SIGNIFICANT CONTACT CHANGES, PROBLEMS WITH MODEL

CHANGE, PROBLEMS WITH BOTH STATIC STEP AND STEADY STATE DYNAMIC PROCEDURES WHERE ACOUSTIC

ELEMENTS WILL ONLY BE ACTIVATED IN THE STEADY STATE DYNAMIC STEPS.

(4) FOR MULTI-PROCESS EXECUTION, THE ESTIMATED VALUE OF FLOATING POINT OPERATIONS FOR EACH PROCESS

IS BASED ON AN INITIAL SCHEDULING OF OPERATIONS AND MIGHT NOT REFLECT THE ACTUAL FLOATING POINT OPERATIONS COMPLETED ON EACH PROCESS. OPERATIONS ARE DYNAMICALLY BALANCED DURING EXECUTION,

SO THE ACTUAL BALANCE OF OPERATIONS BETWEEN PROCESSES IS EXPECTED TO BE BETTER THAN THE ESTIMATE

PRINTED HERE.

(5) THE UPPER LIMIT OF MEMORY THAT CAN BE ALLOCATED BY ABAQUS WILL IN GENERAL DEPEND ON THE VALUE OF

THE "MEMORY" PARAMETER AND THE AMOUNT OF PHYSICAL MEMORY AVAILABLE ON THE MACHINE. PLEASE SEE

THE "ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL" FOR MORE DETAILS. THE ACTUAL USAGE OF MEMORY AND OF DISK

SPACE FOR SCRATCH DATA WILL DEPEND ON THIS UPPER LIMIT AS WELL AS THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE

I/O. IF THE MEMORY UPPER LIMIT IS GREATER THAN THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O, THEN THE ACTUAL

MEMORY USAGE WILL BE CLOSE TO THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" VALUE, AND THE SCRATCH DISK

USAGE WILL BE CLOSE-TO-ZERO; OTHERWISE, THE ACTUAL MEMORY USED WILL BE CLOSE TO THE PREVIOUSLY

MENTIONED MEMORY LIMIT, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE ROUGHLY PROPORTIONAL TO THE DIFFERENCE

BETWEEN THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" AND THE MEMORY UPPER LIMIT. HOWEVER ACCURATE

ESTIMATE OF THE SCRATCH DISK SPACE IS NOT POSSIBLE.

(6) USING "\*RESTART, WRITE" CAN GENERATE A LARGE AMOUNT OF DATA WRITTEN IN THE WORK DIRECTORY.

1

Abaqus 6.13-1

Date 16-mars-2023 Time 13:12:30

For use by under license from DassaultSystemes or its subsidiary.

STEP 2 INCREMENT 1  
TIME COMPLETED IN THIS STEP 0.00

STEP 2 STATIC ANALYSIS

## ANNEXE

AUTOMATIC TIME CONTROL WITH -  
A SUGGESTED INITIAL TIME INCREMENT OF 1.00  
AND A TOTAL TIME PERIOD OF 1.00  
THE MINIMUM TIME INCREMENT ALLOWED IS 1.000E-05  
THE MAXIMUM TIME INCREMENT ALLOWED IS 1.00

LINEAR EQUATION SOLVER TYPE DIRECT SPARSE

### MEMORY ESTIMATE

PROCESS	FLOATING PT OPERATIONS PER ITERATION	MINIMUM MEMORY REQUIRED (MBYTES)	MEMORY TO MINIMIZE I/O (MBYTES)
1	1.04E+009	42	78

#### NOTE:

(1) SINCE ABAQUS DOES NOT PRE-ALLOCATE MEMORY AND ONLY ALLOCATES MEMORY AS NEEDED DURING THE ANALYSIS, THE MEMORY REQUIREMENT PRINTED HERE CAN ONLY BE VIEWED AS A GENERAL GUIDELINE BASED ON THE BEST

KNOWLEDGE AVAILABLE AT THE BEGINNING OF A STEP BEFORE THE SOLUTION PROCESS HAS BEGUN.

(2) THE ESTIMATE IS NORMALLY UPDATED AT THE BEGINNING OF EVERY STEP. IT IS THE MAXIMUM VALUE OF THE

ESTIMATE FROM THE CURRENT STEP TO THE LAST STEP OF THE ANALYSIS, WITH UNSYMMETRIC SOLUTION TAKEN

INTO ACCOUNT IF APPLICABLE.

(3) SINCE THE ESTIMATE IS BASED ON THE ACTIVE DEGREES OF FREEDOM IN THE FIRST ITERATION OF THE CURRENT STEP, THE MEMORY ESTIMATE MIGHT BE SIGNIFICANTLY DIFFERENT THAN ACTUAL USAGE FOR

PROBLEMS WITH SUBSTANTIAL CHANGES IN ACTIVE DEGREES OF FREEDOM BETWEEN STEPS (OR EVEN WITHIN

THE SAME STEP). EXAMPLES ARE: PROBLEMS WITH SIGNIFICANT CONTACT CHANGES, PROBLEMS WITH MODEL

CHANGE, PROBLEMS WITH BOTH STATIC STEP AND STEADY STATE DYNAMIC PROCEDURES WHERE ACOUSTIC

ELEMENTS WILL ONLY BE ACTIVATED IN THE STEADY STATE DYNAMIC STEPS.

(4) FOR MULTI-PROCESS EXECUTION, THE ESTIMATED VALUE OF FLOATING POINT OPERATIONS FOR EACH PROCESS

IS BASED ON AN INITIAL SCHEDULING OF OPERATIONS AND MIGHT NOT REFLECT THE ACTUAL FLOATING POINT OPERATIONS COMPLETED ON EACH PROCESS. OPERATIONS ARE DYNAMICALLY BALANCED DURING EXECUTION,

SO THE ACTUAL BALANCE OF OPERATIONS BETWEEN PROCESSES IS EXPECTED TO BE BETTER THAN THE ESTIMATE

PRINTED HERE.

(5) THE UPPER LIMIT OF MEMORY THAT CAN BE ALLOCATED BY ABAQUS WILL IN GENERAL DEPEND ON THE VALUE OF

THE "MEMORY" PARAMETER AND THE AMOUNT OF PHYSICAL MEMORY AVAILABLE ON THE MACHINE.

PLEASE SEE

THE "ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL" FOR MORE DETAILS. THE ACTUAL USAGE OF MEMORY AND OF DISK

SPACE FOR SCRATCH DATA WILL DEPEND ON THIS UPPER LIMIT AS WELL AS THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE

I/O. IF THE MEMORY UPPER LIMIT IS GREATER THAN THE MEMORY REQUIRED TO MINIMIZE I/O, THEN THE ACTUAL

MEMORY USAGE WILL BE CLOSE TO THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" VALUE, AND THE SCRATCH DISK

USAGE WILL BE CLOSE-TO-ZERO; OTHERWISE, THE ACTUAL MEMORY USED WILL BE CLOSE TO THE PREVIOUSLY

## ANNEXE

MENTIONED MEMORY LIMIT, AND THE SCRATCH DISK USAGE WILL BE ROUGHLY PROPORTIONAL TO THE DIFFERENCE

BETWEEN THE ESTIMATED "MEMORY TO MINIMIZE I/O" AND THE MEMORY UPPER LIMIT. HOWEVER ACCURATE

ESTIMATE OF THE SCRATCH DISK SPACE IS NOT POSSIBLE.

(6) USING "\*RESTART, WRITE" CAN GENERATE A LARGE AMOUNT OF DATA WRITTEN IN THE WORK DIRECTORY.

THE ANALYSIS HAS BEEN COMPLETED

ANALYSIS COMPLETE

WITH 195 WARNING MESSAGES ON THE DAT FILE

JOB TIME SUMMARY

USER TIME (SEC) = 2.6000

SYSTEM TIME (SEC) = 0.30000

TOTAL CPU TIME (SEC) = 2.9000

WALLCLOCK TIME (SEC) = 2