



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie



جامعة محمد بوضياف - المسيلة
Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Département de GENIE CIVIL

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de
MASTER

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Structures

THEME

**Évaluation de la résistance et la
ductilité des connecteurs en « I »**

Dirigé par :

Dr. Messaoud TITOUUM

Présenté par :

Abd Elmalik GOUFI

Promotion : 2015/2016



Remerciement



En premier lieu, je remercie Dieu de m'avoir donné la force, le courage et la volonté pour achever ce modeste travail.

Je remercie Mon encadreur Dr. M.TITOUM de m'avoir proposé ce sujet de mémoire, de l'attention qu'il a portée à mon travail et des moments de discussion précieuse qu'il m'a réservés. Je le remercie infiniment pour sa confiance, ses précieux conseils, sa disponibilité et sa courtoisie.

Mes sincères remerciement et grâces à tous mes enseignants, du primaire aux études supérieures.

Mes remerciements et ma reconnaissance sont adressés envers mes collègues pour un temps précieux passé ensemble. Mes plus vifs remerciements vont également à tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments inoubliables pendant mes études

Enfin, toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail et en particulier l'ensemble des enseignants du département de génie civil de M'sila,



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

La personne la plus chère dans le monde, la lumière de ma vie, la source de tendresse, celle qui a sacrifiée et souffert les plus belles années de sa vie pour me voir un jour réussir :

**♥♥ *Ma chère mère* ♥♥
*2^{ème} ma chère mère***

*A mes chers frères **Wahid , Abd Elhakim , Fouwaz , Salah, Emar, Leid***

A mes chères sœurs

A toutes la famille,



ملخص :

في هذه الدراسة، نقدم نموذجا ثلاثي الأبعاد لعنصر محدد باستخدام برنامج (ANSYS) لمحاكاة تجربة القص مع الرابط « I ». الهدف في هذه المذكرة يدور حول تحديد مقاومة الرابط «I» الراسية في بلاطة الخرسانة المسلحة الخاضعة لتحميل ثابت. ولقد تم التحقق من النموذج العددي بمقارنته مع الاختبارات التجريبية التي أجريت على مستوى مخبر الهندسة المدنية في المسيلة، بعدما أجرينا دراسة لعدة متغيرات (اختلاف مقاومة الخرسانة f_{ck} و عرض الرابط L_I) لتسليط الضوء على مدى تأثيريهما على مقاومة الرابط.

نتائج هذه الدراسة تبين أن الرابط « I » يظهر سلوكا لين لان الانزلاق ($S < 6$ ملم) ومنه نستنتج انه يمكن استخدامه في تصميم حالات المطاوعة للروافد المختلطة. ونلاحظ أن مقاومة القص للموصل «I» المحسوبة بالقانون الكندي CSA هي الأقرب للنتائج التجريبية.

كلمات مفتاحية: الصلب -الخرسانة، الروافد المختلطة، الروابط، تجارب القص، وطريقة العناصر المحدودة.

Résumé :

Dans cette étude, on a proposé un modèle d'élément finis tridimensionnel présenté par le logiciel ANSYS v 12 pour simuler l'essai de cisaillement « Push-Out » avec un connecteur en « I ».

L'objectif est la détermination de la résistance d'un connecteur en « I » ancré dans une dalle en béton armé soumis à un chargement statique. Le modèle numérique a été vérifié par comparaison avec des essais expérimentaux effectué dans le laboratoire de Génie Civil à M'sila. Une étude paramétrique est effectuée pour mettre en évidence l'influence de la variation de la résistance du béton f_{ck} et la largeur L_I du connecteur.

Les résultats de cette étude montre que le connecteur en « I » présente un comportement ductile ($S > 6 \text{ mm}$) et il peut être utilisé dans le calcul plastique des poutres mixtes, et on a remarqué que la résistance au cisaillement du connecteur en « I » calculée par le règlement canadien CSA est la plus proche des résultats expérimentaux.

Mots clés : acier-béton, poutres mixtes, connecteurs, Essai de cisaillement, Méthode des Élément finis.

Abstract :

In this study, it was suggested a model of three-dimensional finite element presented by the software ANSYS v12 to simulate the "Push-Out" shear test with the « I » connector.

The goal is the determination of the resistance of the connector « I » anchored in a slab of reinforced concrete subjected to static loading. The numerical model was verified by comparison with experimental trials carried out in M'sila at the laboratory of Civil Engineering. A parametric study is carried out to highlight the influence of the variation of the resistance of the f_{ck} concrete and width L_I of the connector.

The results of this study shows that « I » connector has a ductile behavior ($S > 6 \text{ mm}$) and it can be used in the plastic calculation of composite beams, and it was noted that the « I » connector shear strength calculated by Canadian regulation CSA is closest to the experimental results.

Key words : steel-concrete, composite beams, connectors, shear test, Finite Element method.

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des notations	
ملخص	
Résumé	
Abstract	
Introduction général :.....	1
Chapitre I : Etude bibliographique sur la connexion acier-béton	
Introduction :.....	4
I-1- Effet de la connexion (acier-béton) :.....	5
I-2- Types des connecteurs :.....	6
I-3- Essai de cisaillement « <i>Push-Out</i> » :.....	6
I-4- Résistance des connecteurs :.....	8
I-4-1- Résistance des goujons soudés :.....	8
I-4-2- Résistance de connecteur en équerre clouée :.....	9
I-4-3- Résistance des connecteurs en cornière soudée :.....	9
I-5- Classifications des connecteurs selon la capacité de glissement :.....	10
I-6- Dimensionnement de la connexion dans les poutres mixtes :.....	11
I-6-1- Modes de connexion :.....	11
a- Connexion complète :.....	11
b- Connexion partielle :.....	11
I-6-2- Calcul de la connexion :.....	11
a- Calcul élastique de la connexion :.....	11
b- Calcul plastique de la connexion :.....	12
I-6-3- Nombre de connecteurs :.....	13
I-6-4- Espacement des connecteurs (e) :.....	13
I-7- Conclusion :.....	14
Chapitre II : Essais de « <i>Push-Out</i> » sur des connecteurs en «I»	
Introduction :.....	16
II-1-Programme expérimental :.....	17

II-1-1-Description des spécimens d'essai :	17
II-1-2-Characterisation des matériaux :	19
a-Béton :	19
b-Acier.....	21
II-1-3-Dispositif d'essai et instruments de mesure.....	23
II-2-Résultats des essais de push-out :	24
II-2-1-Courbes (charge – glissement).....	26
II-3- Etude paramétriques :	27
II-3-1- Effet de la résistance du beton.....	27
II-3-2-Effet de la longueur du connecteur.....	28
II-4- Conclusion :	29

Chapitre III : Modélisation par éléments finis de l'essai « Push-Out »

Introduction :	31
III-1- Etapes de la modélisation numérique :	31
III-1-1- Présentation du modele.....	31
III-2- Eléments finis utilise :	33
III-2-1- Eléments finis SOLID65.....	33
III-2-2- Eléments finis SOLID45.....	34
III-2-4- CONTA-173 & TARGE170.....	35
III-3- Propriétés mécaniques des matériaux :	35
III-3-1- Béton.....	35
III-3-2- Acier.....	36
III-4- Définition des maillages des éléments finis :	37
III-5- Conditions aux limites et l'application des charges :	38
III-5-1- Conditions aux limites.....	38
III-5-2- Application des charges.....	39
III-6- Exécution du calcul :	40
III-7- Formulation de la résistance au cisaillement du connecteur en « I » :	42
III-6- Conclusion :	44

Chapitre IV : Étude paramétrique

Introduction :	46
IV-1 - Modelé adopte :	46
IV-2- Effet de la résistance caractéristique du béton :	47
IV-2-1- Commentaire.....	47
IV-3- Effet de la largeur des connecteurs (L_I) :	48

IV-3-1- Commentaire.....	48
IV-4- Conclusion général :.....	49
Référence bibliographiques.....	51

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 . Poutre mixte. [12].....	4
Figure I. 2. Principes du fonctionnement du mécanisme mixte. [12]	5
Figure I. 3. Illustre les types les plus courants des connecteurs. [2]	6
Figure I. 4. Spécimen de l'essai de « <i>Push-Out</i> » selon EUROCODE 4. [5]	7
Figure I. 5. Modes de ruine des connecteurs «dalle pleine» ; EC-4. [7]	7
Figure I. 6. Modes de ruine des connecteurs selon l'EC-4. [7].....	8
Figure I. 7. Courbe Cisaillement-Glisement. [16]	11
Figure I. 8. Modèle de calcul élastique de l'effort rasant. [15].....	12

Chapitre II

Figure II. 1: Connecteurs en « I ».....	17
Figure II. 2. : Spécimen d'essai de push-out avec des connecteurs en «I ».	19
Figure II. 3. Huilage des semelles et disposition des barres d'armature.	19
Figure II. 4. Coffrage du bloc de béton.	20
Figure II. 5. Spécimens de « <i>Push-Out</i> » avec des connecteurs en « I ».	21
Figure II. 6. Essais de compression sur des éprouvettes en béton.	21
Figure II. 7. Essais de traction sur des éprouvettes en acier.....	23
Figure II. 8. Dispositif d'essai et instruments de mesure.	24
Figure II. 9. Rupture par cisaillement de l'âme du connecteur.	26
Figure II. 10. Rupture par fissuration et écrasement du béton.	26
Figure II. 11. Déformation du connecteur en « I ».....	27
Figure II. 12 . Courbes (charge-glisement) pour les spécimens I-1, I-2 et I-3.	28
Figure II. 13. Effet de la résistance du béton.	28
Figure II. 14 : Effet de la longueur du connecteur.....	29

Chapitre III

Figure III. 1. Etapes pour l'élaboration d'un modèle d'éléments finis.	32
Figure III. 2. Eprouvette d'essai « <i>Push-Out</i> » à modéliser.	33
Figure III. 3. Un quart de l'éprouvette « <i>Push-Out</i> »).....	33
Figure III. 4. SOLID65 géométrie.....	34
Figure III. 5. SOLID45 géométrie.....	35
Figure III. 6. Link8 géométrie.	35
Figure III. 7. CONTA-173 & TARGE170.....	36

Figure III. 8. Diagramme contrainte – déformation d’un béton normal.	37
Figure III. 9. Diagramme bilinéaire de contrainte déformation de l’acier.	38
Figure III. 10. Groupes d’éléments finis : (A) dalle de Profil de béton, en acier (B), connecteurs de cisaillement (C)	39
Figure III. 11. Maillage du modèle avec conditions aux limites.....	40
Figure III. 12. Le modèle numérique avec l’application des charges.	41
Figure III. 13. Modèle numérique avant et après appliquer la charge	41
Figure III. 14. Déformation du connecteur.	42
Figure III. 15. Distribution des contraintes de Von Mises	42
Figure III. 16. Les courbes théorique et expérimentale (charge-glisement) de l’éprouvette I-3.43	

Chapitre IV

Figure IV. 1. Modèle utilisé pour l’étude paramétrique.....	47
Figure IV. 2. Effet de la résistance de béton f_{ck}	48
Figure IV. 3. Effet de la largeur des connecteurs L_I	49

Liste des tableaux

Tableau II. 1. Spécimens testés.	17
Tableau II. 2. Caractéristiques mécaniques du béton.....	21
Tableau II. 3. Caractéristiques mécaniques de l’acier.....	22
Tableau II. 4. Résultats des essais.	24
Tableau III. 1. Résistance au cisaillement des connecteurs en « I » - Comparaison.....	44

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

Introduction :

Béton et acier de construction sont les deux matériaux les plus utilisés dans l'industrie de la construction. Chaque fois que ces matériaux sont utilisés individuellement, il y a des faiblesses inhérentes où le béton est inefficace pour résister à la charge de traction et de sections d'acier de construction minces sont sensibles à la charge de flambage. Cependant, quand ils sont combinés ensemble pour former ce qu'on appelle la construction mixte, le bien-fondé de ces deux matériaux sont utilisés de façon optimale. L'efficacité de la construction mixte est augmentée de manière significative lorsque le béton est utilisé pour la compression et de l'acier en traction. En outre, le béton offre une résistance à la corrosion et protection contre les incendies de profilés en acier et réduit la sensibilité des sections en acier minces à des modes de flambage

L'utilisation de poutres mixtes acier-béton a gagné en popularité dans le siècle dernier, à sa capacité de bien combiner les avantages de l'acier et le béton. Les éléments mixtes présentent une résistance accrue et une rigidité par rapport à la contribution de leurs composants agissant séparément, et représentent une solution structurelle compétitive dans de nombreuses applications de génie civil, tels les ponts et les bâtiments. Dans les années 40 et 50 du siècle dernier, les premières études sur le comportement de la poutre mixte soulignent que le déplacement relatif entre la poutre d'acier et la dalle en béton armé nécessite d'être inclus dans le modèle de poutre pour une représentation adéquate de l'action mixte. En fait l'action composite dépend de l'interaction entre les trois composantes principales : la dalle en béton armé, le profil d'acier, et la connexion.

Le principal avantage des éléments mixtes acier-béton sur les éléments en béton armé classiques est que la section transversale peut être considérablement réduite, si l'action composite peut être obtenue entre l'acier et le béton. Depuis des obligations naturelles peut ne pas être efficace pour une action composite, plusieurs types différents des systèmes de connexion sont prévus pour les éléments mixtes acier-béton pour obtenir l'action composite. Cependant, la pleine action -composite ne peut être obtenue puisque les éléments mixtes acier-béton montrent une interaction partiel en raison de la déformation et de glissement à l'interface sous les charges appliquées.

Les recherches expérimentales et théoriques sur l'étude du comportement des goujons à tête sont assez nombreuses, mais elles sont rares sur les autres types de connecteurs. [1]

A cet effet, nous avons mené notre étude sur les connecteurs en « I ». Qui peuvent assurer la connexion.

L'objectif principal de ce travail est l'étude du comportement au cisaillement d'un nouveau type de connecteur pour les poutres mixtes acier – béton.

INTRODUCTION GENERALE

Les objectifs spécifiques sont :

Effectuer d'essais de cisaillement de type « *Push-Out* » sur le connecteur proposé et de déterminer sa résistance et sa ductilité.

Étudier le connecteur numériquement par la méthode des éléments finis, d'apprendre à connaître son comportement structural et vérifier si vous avez suffisamment d'avantages pour continuer l'étude expérimentale.

Notre travail de recherche est constitué de quatre chapitres et d'une conclusion générale :

Nous présentons dans le premier chapitre une étude bibliographique sur la connexion acier-béton dans les poutres mixtes.

L'objet du deuxième chapitre est la description des essais de cisaillement « *Push-Out tests* » appliquées sur les connecteurs, en particulier, le connecteur en « I ». Afin de déterminer la résistance ultime au cisaillement, le mode de ruine de la connexion et la courbe de comportement (cisaillement-glisement).

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation par éléments finis du comportement au cisaillement de connecteur en « I ». Dans une éprouvette d'essai « *Push-Out* » en utilisant le logiciel ANSYS-Version 12. La validation du modèle proposé se fait par comparaison des résultats numériques aux données expérimentales.

Le quatrième chapitre consiste à effectuer une étude paramétrique pour mettre en évidence les principaux paramètres influençant le comportement au cisaillement des connecteurs en « I ». Ces paramètres sont :

- Effet de la résistance du béton ;
- Effet des dimensions du connecteur ;

Et pour terminer, nous présentons une conclusion générale pour ressortir tous les points importants de cette recherche.

CHAPITRE I :

Étude bibliographique sur la connexion
acier-béton

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur la connexion acier-béton

Introduction :

Dans la plupart des structures (bâtiment, pont ...), l'un des principaux besoins de l'ingénieur est de créer des surfaces horizontales qui permettent de supporter les charges verticales imposées à la structure avec un minimum d'appuis intermédiaires. Dans beaucoup de cas, ces surfaces horizontales sont créées par des dalles en béton armé, pour les faibles portées, ou en béton précontraint. Dans la pratique, la dalle est appuyée sur des poutres. Pour les faibles portées où les poutres sont le plus souvent en béton armé, une partie de la dalle fonctionne en tant que semelle supérieure de la poutre, ce qui augmente considérablement sa raideur et sa résistance. Les planchers en béton armé peuvent trouver leur justification lorsque la longueur de travée est de l'ordre de 6-8m. Avec des longueurs plus importantes, la volonté d'alléger la structure mène à remplacer les poutres en béton armé par des poutres métalliques.

Dans le cas des poutres mixtes, les dalles en béton sont appuyées sur les profilés métalliques avec une liaison plus ou moins forte. Si la dalle et la poutre sont librement superposées, les deux éléments fléchissent de manière autonome avec un glissement libre à leur interface. Par contre, le fait de créer des liaisons à l'interface acier béton permet d'augmenter la résistance et la raideur de la poutre.

L'interaction entre les parties acier et béton d'une structure mixte est le plus souvent créée par des connecteurs qui sont chargés de transférer les efforts internes entre la dalle et la poutre métallique. La section mixte typique est alors constituée de la poutre métallique, de la dalle en béton armé avec des barres de ferrailage placées dans le sens longitudinal et transversal et de connecteurs (Fig. I.1). [12]

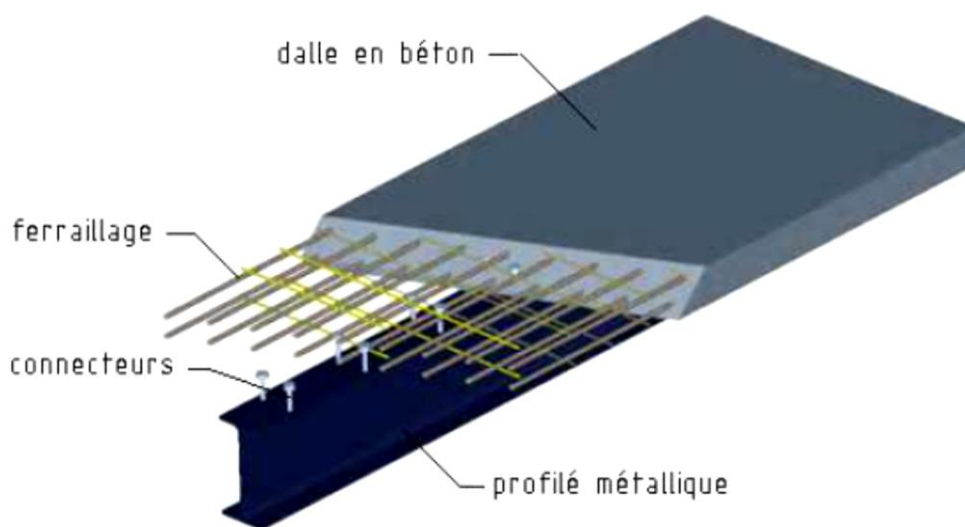


Figure I. 1 . Poutre mixte. [12]

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur la connexion (Acier – Béton) dans les poutres mixtes

I-1- Effet de la connexion (acier-béton) :

Dans une poutre mixte, généralement la partie supérieure de la dalle est nécessaire pour la compression et la base du profilé métallique de traction est requise. En outre, le profil de la dalle de béton et d'acier a des propriétés mécaniques et géométriques distinctes, telles que le module d'élasticité et la section. En raison de ces différences, la réaction des matières de charge sont différents, il y a la tendance d'un glissement relatif entre eux. En l'absence de connecteurs de cisaillement entre les deux matériaux, cela se produit couissant librement, et la poutre est hybride sans action conjointe avec chaque matériau agissant séparément, ainsi que la séparation (le soulèvement de la dalle).

Afin d'illustrer l'importance de l'interaction de deux éléments sollicités en flexion, analysons tout d'abord un exemple théorique, dont le schéma est présenté sur la (Fig. 1.2). Considérons deux poutres, de même section rectangulaire et d'un même matériau, dont l'une est supportée par l'autre ; dans un cas on suppose qu'il n'y a pas de liaison à l'interface des poutres, dans l'autre que la solidarisation est parfaite (Fig. I.2). [13]

Dans le cas où aucune liaison n'existe entre les deux éléments, chacun d'entre eux reprend la moitié de l'effort appliqué. Dans ce cas, la flèche et les déformations du système sont 2 fois moins grandes que dans le cas, où la totalité du chargement serait reprise par une seule de ces poutres. Dans le cas où la liaison entre les deux éléments est parfaitement rigide, on obtient une section homogène d'une hauteur 2h, dont l'inertie est 4 fois plus importante que celle d'une seule poutre. Les flèches de cette poutre avec une connexion rigide sont alors 4 fois moins grandes que les flèches de la poutre de base agissant seule et deux fois moins grandes que les flèches de deux poutres superposées et non connectées. [12]

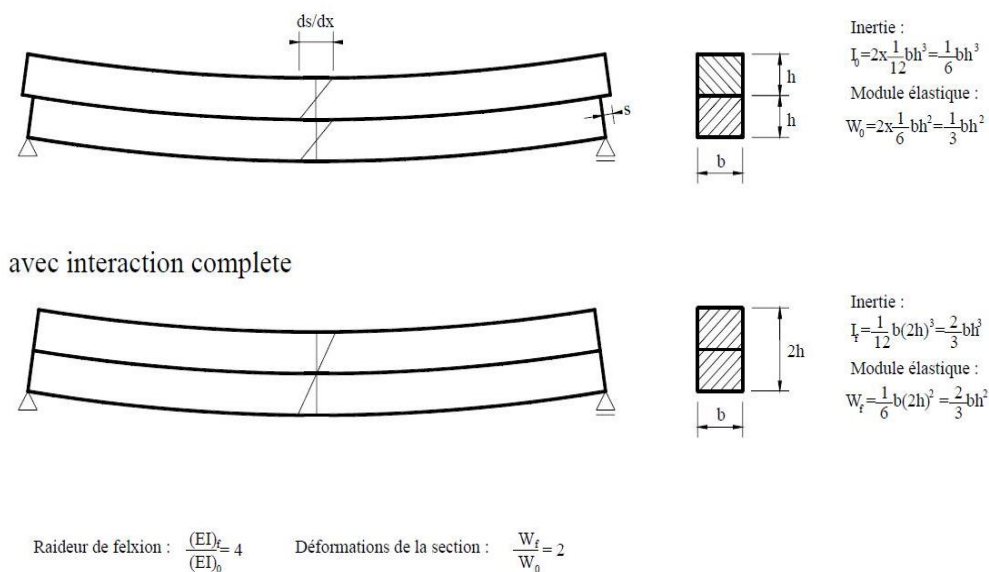


Figure I. 2. Principes du fonctionnement du mécanisme mixte. [12]

I-2- Types des connecteurs :

Les nombreuses études menées sur les connecteurs ont montré qu'il n'existe pas un connecteur idéal. Le choix de tel ou tel connecteur dépend autant de son coût et de sa facilité de mise en œuvre que de ses performances mécaniques. La (Fig. I.3) illustre les types les plus courants des connecteurs. [2]

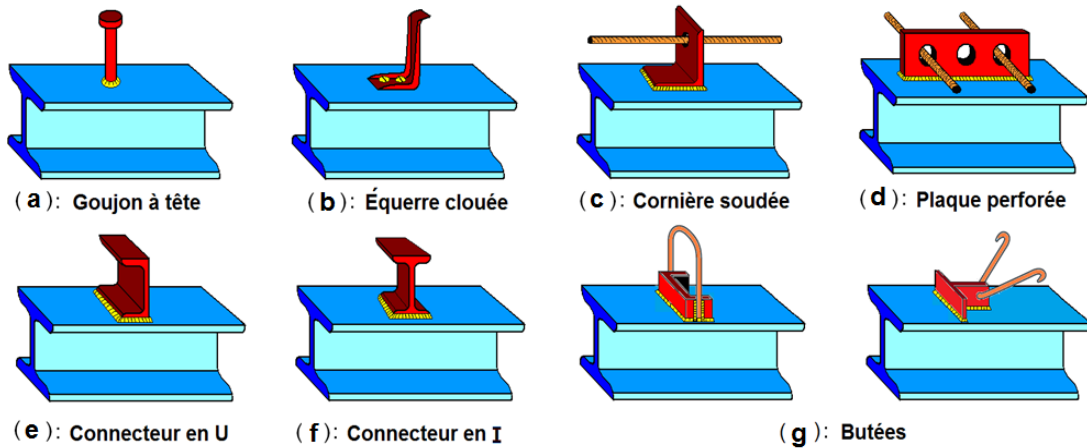


Figure I. 3. Illustre les types les plus courants des connecteurs. [2]

I-3- Essai de cisaillement « *Push-Out* » :

L'évaluation du comportement structural des connecteurs de cisaillement est possible pour les tests appelés test de « *Push-Out* ». De tels dosages permettent d'obtenir la courbe force-glissement, la dernière force et le mode d'effondrement de la liaison.

Les procédures actuelles d'essais de type « *Push-Out* », y compris spécification des dimensions des modèles à tester et la détermination de capacité des connecteurs nominale. (Fig. I.4) contient des détails sur le modèle adopté par EUROCODE 4 pour dosage. Le modèle se compose d'un type de profil en acier "H" connecté à deux tables de béton par des connecteurs de cisaillement. Les tables en béton doivent être.

Pourvu d'armatures, dont la position et le diamètre des barres sont également spécifiés. A la fois l'EUROCODE 4 comme la norme britannique BS 5400.

L'essai consiste essentiellement à l'application d'une force verticale sur le profilé en acier, pour mesurer le glissement relatif entre la table et le profil de béton pour chaque augmentation de la charge, permettant ainsi la construction de la courbe force glissement. [13].

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur la connexion (Acier – Béton) dans les poutres mixtes

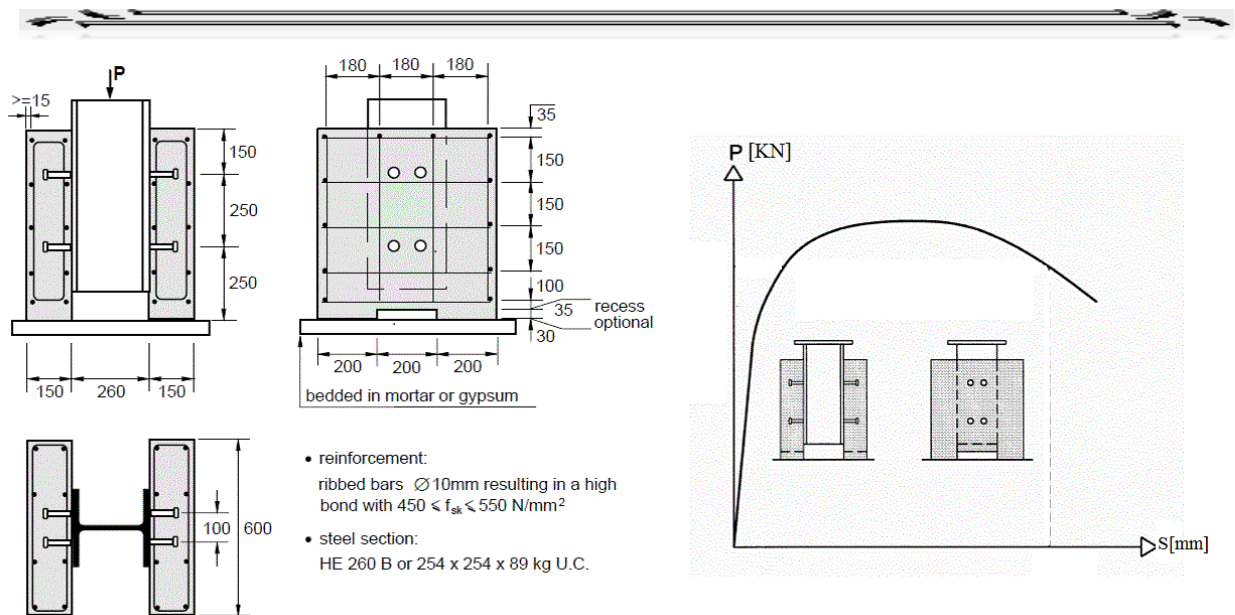


Figure I. 4. Spécimen de l'essai de push-out selon EUROCODE 4. [5]

Les modes des ruptures possibles sont illustrés sur la (Fig. I.5) et (Fig. I.6). L'effondrement peut également être une combinaison de ces modes.

La résistance à la compression du béton est un paramètre qui influence sur la capacité nominale du connecteur. Rupture peut se produire.

La rupture par cisaillement des connecteurs peut se produire dans la résistance au béton.

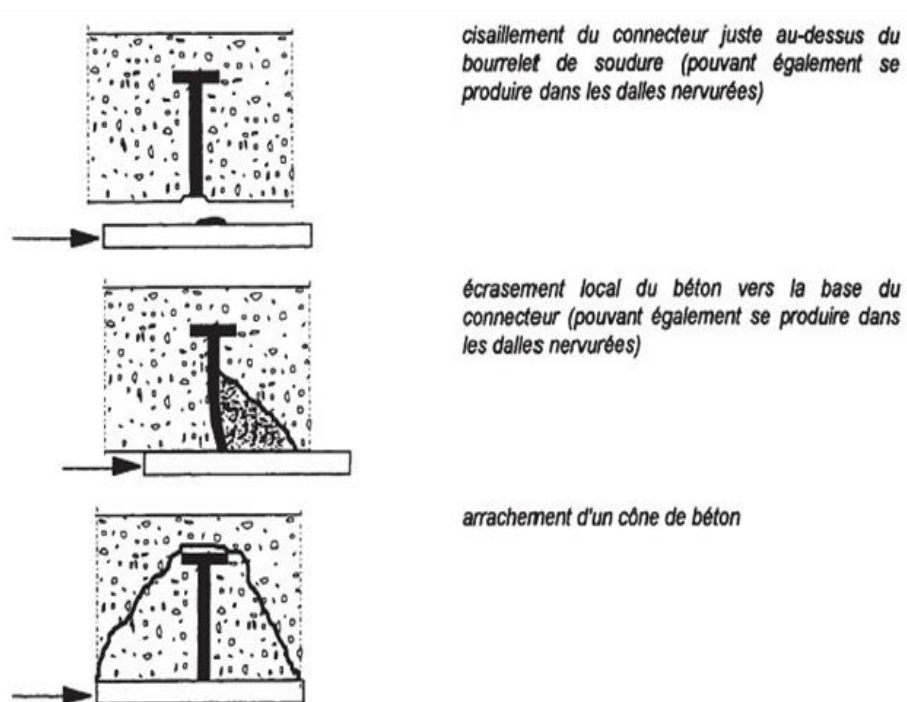


Figure I. 5. Modes de ruine des connecteurs «dalle pleine» ; EC-4. [7]

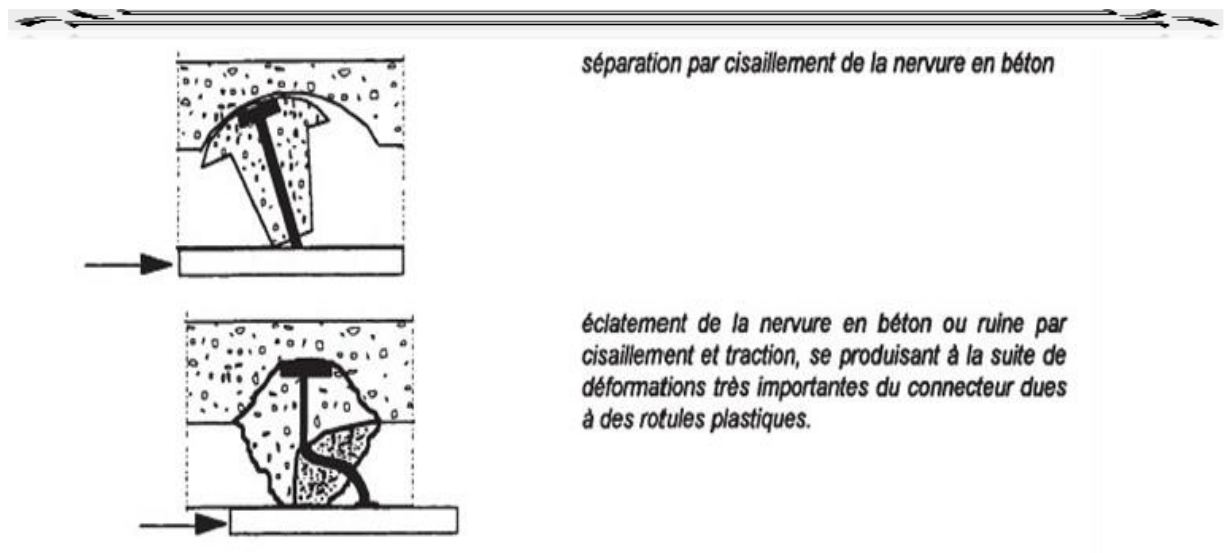


Figure I. 6. Modes de ruine des connecteurs selon l'EC-4. [7]

I-4- Résistance des connecteurs :

La caractérisation des connecteurs est basée sur les résultats expérimentaux, les présentes règles ou les expressions tables pour déterminer la capacité des principaux types des connecteurs de cisaillement.

I-4-1- Résistance des goujons soudés :

La résistance ultime au cisaillement P_u d'un goujon dépend de plusieurs facteurs :

- Forme et dimensions des connecteurs.
- Qualité de sa force matérielle (f_u).
- Type de charge (statique et dynamique)
- Manière de relier le profilé d'acier avec le connecteur.
- Espacement des connecteurs.
- Type et résistance de béton.
- La présence ou non de la tôle profilée.

Tous ces facteurs individuellement, et/ou conjointement, influent sur les expressions de la force de cisaillement des connecteurs.

L'Eurocode 4 donne la valeur de résistance ultime au cisaillement P_u d'un goujon à tête noyé dans une dalle pleine en béton (sans présence de la tôle profilée). Le diamètre du goujon ne doit pas être supérieur à 22 mm.

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur la connexion (Acier – Béton) dans les poutres mixtes

$$P_u = \min [P_{u1}, P_{u2}] \dots (I.1)$$

Où

Résistance de rupture de la tige :

$$P_{u1} = 0.8f_u(\pi d^2/4) \dots\dots(I.2)$$

Résistance de l'écrasement du béton :

$$P_{u2} = 0.29\alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} \dots\dots(I.3)$$

Où l'on désigne par :

α : $0.2 [h_{RD}/d_{RD} + 1]$ pour $3 \leq h/d_{RD} \leq 4$

α : 1 pour $h_u/d_u > 4$

γ_v : coefficient partiel de sécurité est pris égal à 1.25.

On peut remarquer que :

- Il est admis d'utiliser la formule (I.1) pour les goujons sans tête, à condition de calculer les dispositifs d'anti-soulèvement de la dalle.
- L'espacement des goujons dans la direction de l'effort de cisaillement doit être $\geq 5d_u$; et dans le sens perpendiculaire doit être $\leq 2.5d_u$
- Il convient de prendre la formule (I.1) pour déterminer la résistance des goujons en la présence de la tôle nervurée multipliée par le coefficient numérateur $k_{l,t}$.

I-4-2- Résistance de connecteur en équerre clouée :

La résistance ultime des équerres clouées type « HVB » a été établie sur la base des essais, ainsi les valeurs obtenues sont indépendantes de la direction de l'effort rasant, et valable pour un calcul plastique pour une dalle pleine avec un béton de classe $\geq C 35/25$. Pour le calcul élastique de la résistance ultime, il faut multiplier la résistance ultime par un coefficient de réduction $\alpha = 0.7$

I-4-3- Résistance des connecteurs en cornière soudée :

Dans le cas des cornières soudées sur la semelle supérieure du profilé métallique sa résistance est donnée par la formule empirique suivante :

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur la connexion (Acier – Béton) dans les poutres mixtes

$$P_u = 10.bh^{3/4}.f_{ck}^{2/3} \dots\dots\dots(I.4)$$

Avec :

b : la longueur de la cornière en mm.

h : hauteur de l'aile verticale de la cornière en mm.

Des essais réalisés sur des connecteurs en cornière ont montré que le rapport soulèvement / glissement est faible, et l'EC-4 recommande l'utilisation d'une barre d'armature filante traversant l'aile de la cornière afin de s'opposer au soulèvement de la dalle. Les essais effectués que nous avons effectués ont montré la rupture de cette armature filante. [15]

I-5- Classifications des connecteurs selon la capacité de glissement :

Les connecteurs de cisaillement peuvent être classés quant à leur ductilité rigide ou ductile. Le connecteur rigide est celui qui a peu de distorsion et de faible glissement entre le béton et l'acier de construction lorsque vous êtes invité. Le connecteur ductile a le comportement opposé, déformation bien avant la rupture et permettant un plus grand glissement sur la poutre mixte.

Le connecteur ductile, bien qu'ayant une rupture ductile, ce qui est souhaitable, ont des performances médiocres lorsque vous êtes invité à la fatigue, car il se déforme trop avec la variation cyclique de la charge, à la différence du connecteur rigide. Par exemple le connecteur de type goujon à tête, est souple et à faible résistance à la fatigue, par laquelle se déformer même pour les frais de service. Le connecteur idéal conduirait le comportement sous des charges à ELS et flexible aux charges à ELU.

EUROCODE 4 apporte une définition de la ductilité d'un connecteur de cisaillement issu de glissement caractéristique δ_{uk} , obtenu à partir du l'essai « *Push-Out* », comme nous le verrons au point I-3. Pour les valeurs de ce glissement supérieur à 6,0 mm, le connecteur est considérée comme ductile. Si classé comme flexible, il est supposé que tous les connecteurs sont mobilisés lorsque besoin de charge à la poutre et ainsi, les connecteurs peut distribuer uniformément sur la surface du profil métallique. Dans le cas contraire, le connecteur est considérée comme rigide et la distribution des connecteurs doit prendre en compte la distribution de tension cisaille de l'interface acier-béton. [13].

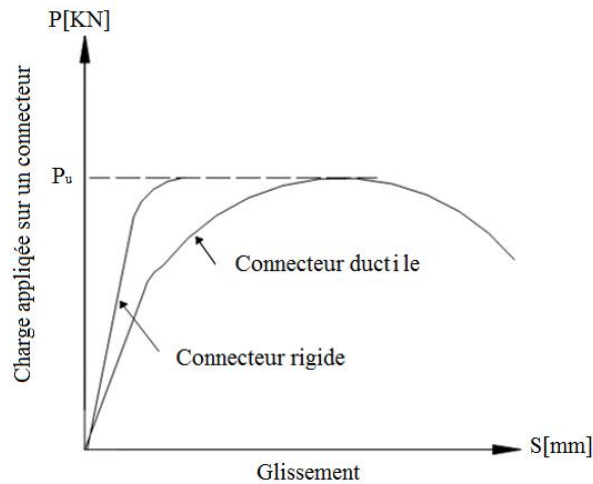


Figure I. 7. Courbe Cisaillement-Glissement. [16]

I-6- Dimensionnement de la connexion dans les poutres mixtes :

I-6-1- Modes de connexion :

On peut classer la connexion dans l'une ou l'autre catégorie comme suit :

a- Connexion complète :

Lorsque la résistance de la connexion est telle que la résistance ultime à la flexion de la poutre ne serait pas augmentée par l'addition de connecteurs supplémentaires, et que le glissement qui est produit à l'interface est faible et peut être négligé, on considère cette connexion complète. La ruine de la poutre est engendrée par la plastification de la section d'acier ou par la ruine du béton. A mentionné dans ses travaux que dans le cas des goujons, la connexion complète n'existe pas, on est toujours en connexion partielle puisque c'est précisément le glissement à l'interface acier béton qui permet de solliciter les goujons.

b- Connexion partielle :

Lorsque le nombre des connecteurs est inférieur à celui requis pour une connexion totale, et que le glissement qui est produit à l'interface ne peut pas être négligé dans le calcul, car il influe sur la déformation et la résistance de la poutre mixte, on considère la connexion incomplète. La ruine de la poutre mixte sera atteinte par la ruine de la connexion. En pratique, la connexion incomplète devrait être prise en compte dans les études élastiques des poutres, par exemple aux états limites de service, plus particulièrement pour le calcul de la flèche ou pour les problèmes de vibration.

I-6-2- Calcul de la connexion :

La théorie des poutres mixte acier-béton est fondée sur l’hypothèse qu’il existe une liaison entre l’acier et le béton. Etant donné que l’adhérence du béton sur les poutres métalliques est trop faible et peu durable pour réaliser cette liaison, la transmission des efforts de cisaillement se fait par l’intermédiaire des connecteurs mécaniques. Leur rôle est d’empêcher le glissement relatif des deux matériaux à leur interface de contact, ainsi que la séparation de la dalle et de la poutre métallique. Selon A. Manfred et M. Crisinel [9] la connexion complète, la connexion incomplète et le degré de connexion n’ont un sens qu’en calcul plastique dans la zone de moments positifs.

a- Calcul élastique de la connexion :

Un calcul élastique de la contrainte de cisaillement (effort rasant) est nécessaire lorsque la résistance des sections mixtes est également établie avec un calcul élastique. Dans ce cas, l’effort de cisaillement dépend directement de l’effort tranchant (Fig. I.8). Il vaut :

$$V_{Ed} = \frac{V^* S_c}{I_m * n} \dots\dots\dots (I-5)$$

Avec :

S_c : moment statique de la dalle (de largeur *beff*) par rapport à l’axe neutre de la section mixte.

On choisit en général des connecteurs identiques sur toute la longueur de la poutre et on fait varier leur espacement de façon à s’adapter à la variation de l’effort de cisaillement à reprendre.

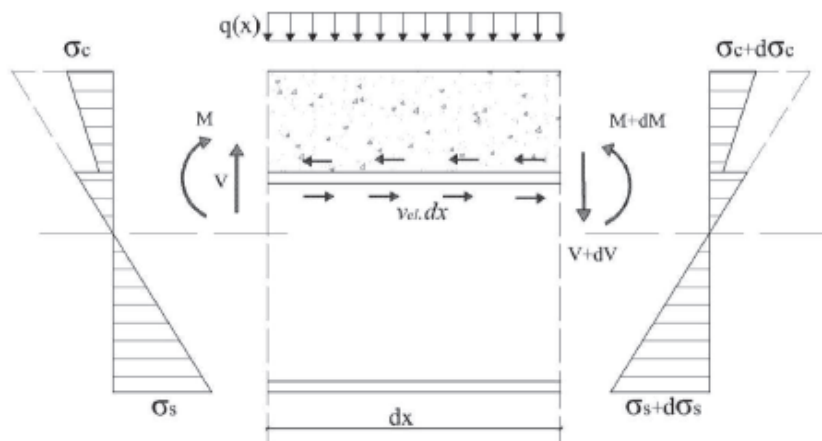


Figure I. 8. Modèle de calcul élastique de l’effort rasant. [15]

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur la connexion (Acier – Béton) dans les poutres mixtes

b- Calcul plastique de la connexion :

Le calcul plastique de l'effort de cisaillement longitudinal (effort rasant) est possible lorsque la résistance des sections mixtes est également établie par un calcul plastique. Son principe ainsi que son application sont très simples. Les connecteurs doivent être capables de supporter l'effort de cisaillement à l'état ultime de la poutre mixte (rotule plastique développée). Dans ce calcul, on admet que la connexion est suffisamment résistante pour que le moment plastique de la section puisse être atteint. La connexion est donc totale et les connecteurs sont dimensionnés pour ne pas être la cause de la ruine de la poutre. Or, dans certains cas, il est judicieux (ou même indispensable ; exemple avec la présence de la tôle nervurée) d'installer moins de connecteurs que nécessaire pour atteindre le moment plastique pour réaliser une connexion partielle. Selon A. Manferd et M. Crisinel [10] & L. Bouazaoui [9] ce calcul s'applique essentiellement aux connecteurs souples et, dans des cas particuliers, aux connecteurs non souples. L'effort rasant est déterminé par un calcul plastique en faisant l'équilibre de chaque tronçon de la poutre situé entre les sections critiques. Dans le cas d'un moment positif (en travée), l'effort rasant est donné par :

$$V_{lf} = \min (f_y \cdot A_s, f_c \cdot A_c) \dots (I.6)$$

Si :

$A_s \leq A_c/n_p$ l'axe neutre se trouve dans la dalle en béton l'effort rasant est égal à :

$$V_{lf}^+ = f_y \cdot A_s \dots (I.6.a)$$

Si $A_s > A_c/n_p$ l'axe neutre se trouve dans le profilé l'effort rasant égale :

$$V_{lf}^- = f_c \cdot A_c \dots (I.6.b)$$

Dans le cas d'un moment négatif (sur appui), l'effort rasant est donné par l'effort dans les armatures :

$$V_{lf}^- = f_{ys} \cdot A_{sy} \dots (I.7)$$

I-6-3- Nombre de connecteurs :

Le nombre de connecteurs à disposer sur une poutre est déterminé en comparant l'effort rasant à reprendre avec la résistance d'un goujon. En calcul élastique (méthode EE), le nombre de connecteurs par unité de longueur varie proportionnellement au diagramme des efforts rasants V_{el} tirés des efforts tranchants V

Le nombre N_{el} (par unité de longueur) est donné par :

Chapitre 1 : Étude bibliographique sur la connexion (Acier – Béton) dans les poutres mixtes

$$N_{el} = V_{d,el} / (V_{rd,el} / \gamma_{rd}) \dots (I.8)$$

Avec :

$V_{d,el}$: Valeur de dimensionnement de l'effort rasant élastique

$V_{rd,el}$: Résistance ultime élastique d'un connecteur.

γ_{rd} : Facteur de résistance relative aux structures mixtes ($\gamma_{rd}=1.1$).

I-6-4- Espacement des connecteurs (e) :

Pour des raisons pratiques de construction, on choisit des connecteurs identiques sur toute la longueur de la poutre.

On fait donc varier leur écartement (e) de façon à s'adopter à la variation de l'effort rasant qui suit la variation de l'effort tranchant.

-Le pas (e) entre deux connecteurs est donné par la relation. [15]

$$e = (P * N) / V_{ed} \dots \dots \dots (1.9)$$

I-7- Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté d'abord le rôle des connecteurs et les différents types des connecteurs utilisés dans les poutres mixtes.

Il apparaît que la connexion peut être totale ou partielle. Elle dépend essentiellement du nombre de connecteurs placés dans la longueur critique d'une poutre. La résistance de la poutre varie également avec la nature de la connexion.

Dans le chapitre suivant nous allons faire une série d'essais de poussé dite : « *Push-Out* ». sur un nouveau type de connecteur se forme de « I » pour évaluer la résistance au cisaillement.

CHAPITRE II :

Essais de cisaillement « *Push-Out* » sur un

Connecteur en « I »

Chapitre 2 : Éssais de Push-out sur des connecteurs en «I»

Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons la procédure expérimentale utilisée pour la caractérisation du comportement au cisaillement des connecteurs en « I ». Ces connecteurs sont fabriqués par découpage transversal des sections en IPE80 suivant des longueurs appropriés (Fig. II.1).

Nous commençons, tout d'abord, par la description des spécimens d'essai de push-out ensuite nous présentons les caractéristiques des matériaux utilisés, nous montrons également le dispositif d'essai et les instruments de mesure, puis nous discutons les résultats des essais qui concernent la résistance au cisaillement du connecteur en « I », sa ductilité et les modes de rupture observés. Nous mettons ainsi en évidence l'influence des principaux paramètres affectant le comportement au cisaillement du connecteur en « I » tels que la largeur du connecteur et la résistance du béton à la compression.

La procédure d'expérimentation est réalisée dans le laboratoire de GENIE CIVIL du département de GENIE CIVIL de l'Université de M'sila.

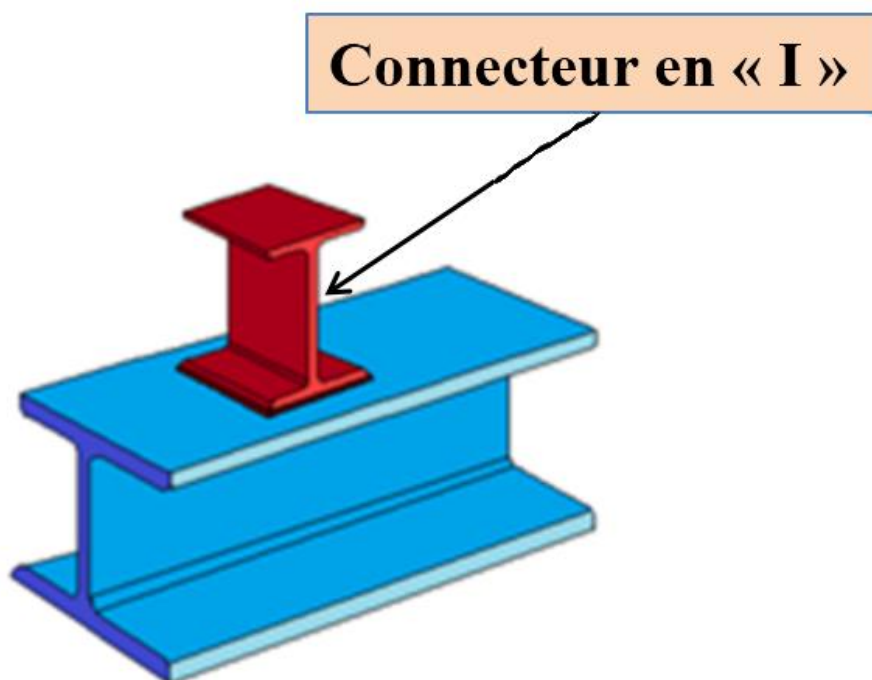


Figure II. 1: Connecteurs en «I ».

II-1-Programme expérimental :

Le programme expérimental consiste à effectuer des essais de cisaillement sur 6 spécimens groupés en trois paires. Chaque paire contient deux spécimens identiques. Les spécimens d'essai sont conçus pour étudier l'influence des paramètres suivants sur la résistance au cisaillement du connecteur en « I » : la largeur du connecteur et la résistance du béton à la compression. Le tableau II-1 présente, pour chaque spécimen, les dimensions du connecteur en « I » et la résistance du béton à la compression.

Essai N	Largueur	Blocs de béton	F _{ck}
I-1a	L=60mm	360x320x120	25.89Mpa
I-1b	L=60mm	360x320x120	25.89Mpa
I-2a	L=60mm	360x320x120	34.27Mpa
I-2b	L=60mm	360x320x120	34.27Mpa
I-3a	L=80mm	360x320x120	25.89Mpa
I-3b	L=80mm	360x320x120	25.89Mpa

Tableau II. 1.: Spécimens testés.

II-1-1- Description des spécimens d'essai :

Les spécimens d'essai de cisaillement (« *Push-Out* » spécimens) sont fabriqués en accordance avec les règles de l'Eurocode-4. Chaque spécimen comporte deux blocs en béton tenus en position verticale, et connectés à un tronçon de profilé métallique en HEB160, à l'aide de deux connecteurs en « I » soudés sur les semelles du profilé métallique et ancrés dans le béton. Le spécimen est soumis à une charge verticale de compression qui produit des efforts de cisaillement à l'interface (acier-béton) entre le bloc de béton et le profilé métallique sur les deux côtés. Un décalage de 60 mm est réservé entre la base des blocs de béton et la section inférieure du profilé métallique pour permettre le glissement relatif entre les deux parties pendant le chargement du spécimen. Pour tous les spécimens, chaque bloc de béton est renforcé longitudinalement et transversalement par quatre barres d'armature de 8 mm de diamètre placées en deux nappes. L'adhérence à l'interface acier-béton a été éliminée par huilage des semelles du profilé métallique avant le coulage des blocs en béton. La (Fig. II.2) présente un aperçu des composants d'un spécimen de « *Push-Out* » avec des connecteurs en « I », tandis que la (Fig. II.3) montre l'opération d'huilage des semelles et la disposition des barres d'armature avant le coulage des blocs en béton.



Figure II. 2. Spécimen d'essai de push-out avec des connecteurs en «I».

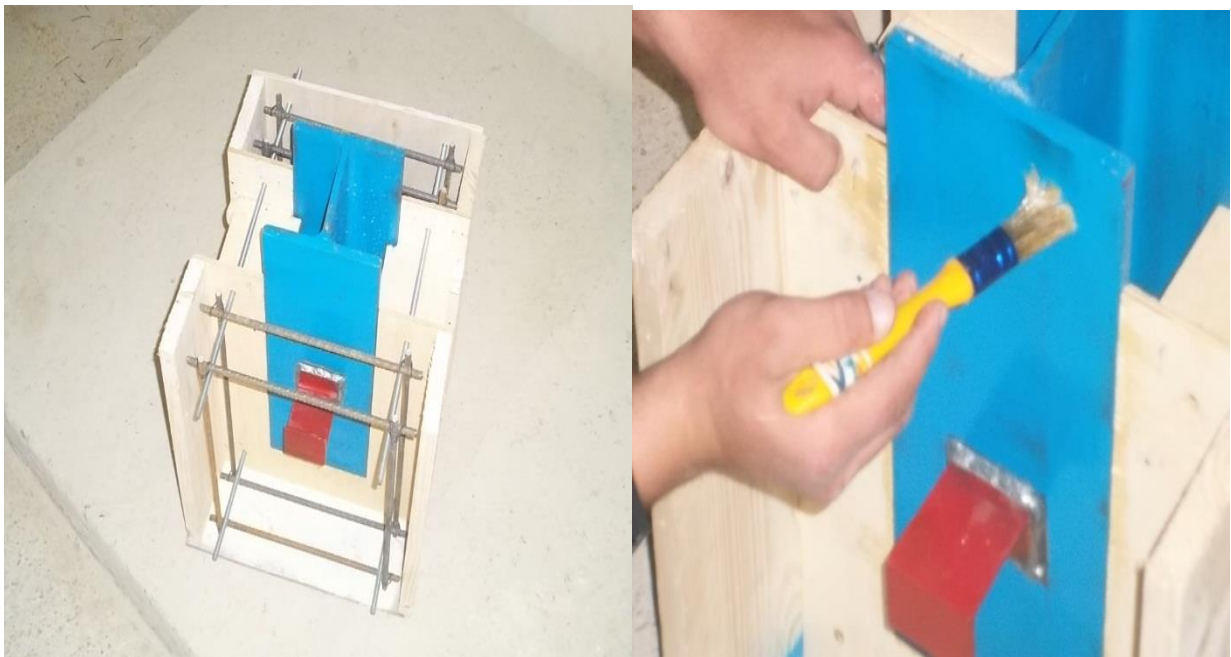


Figure II. 3. Huilage des semelles et disposition des barres d'armature.

II-1-2- Caractérisation des matériaux :

a- Béton :

Le béton utilisé pour les spécimens de push-out est un mélange composé de granulats concassés (gravier 8/15 et 15/25), de sables des rivières (sable roulé de 0/5) et un ciment CPJ-CEM II/B-42.5. La composition a été préparée de façon à obtenir des résistances à la compression proche de 25 et de 35 MPa le jour de l'exécution des essais de push-out. Les quantités d'agrégats employés pour la préparation de deux gâchées de béton ont été préparées par la méthode de Dreux-Gorisse.

Pour le coffrage des blocs de béton, des moules en bois contre-plaqué ont été fabriqués comme la (Fig. II.4). Le béton a été versé dans ces moules. Après le versement, le béton a été correctement vibré en utilisant un vibreur. Le décoffrage a été effectué environ 48 h après le bétonnage et les spécimens ont été stockés à l'air ambiant du laboratoire jusqu'à 28 jours. A titre d'exemple, la (Fig. II.5) donne une vue générale des spécimens. Ces spécimens ont durci à l'air libre.



Figure II. 4. Coffrage du bloc de béton.



Figure II. 5. Spécimens de « *Push-Out* » avec des connecteurs en « I ».

Pour chaque gâchée réalisée, cinq éprouvettes cylindriques de dimensions 16x32 cm ont été prélevées au moment du bétonnage des spécimens de « *Push-Out* ». Ces cylindres de béton ont été examinés dans le même jour d'exécution des essais de push-out. La résistance à la compression a été déterminée à l'aide d'une presse hydraulique de capacité maximale de 3000kN (Fig. II.6).

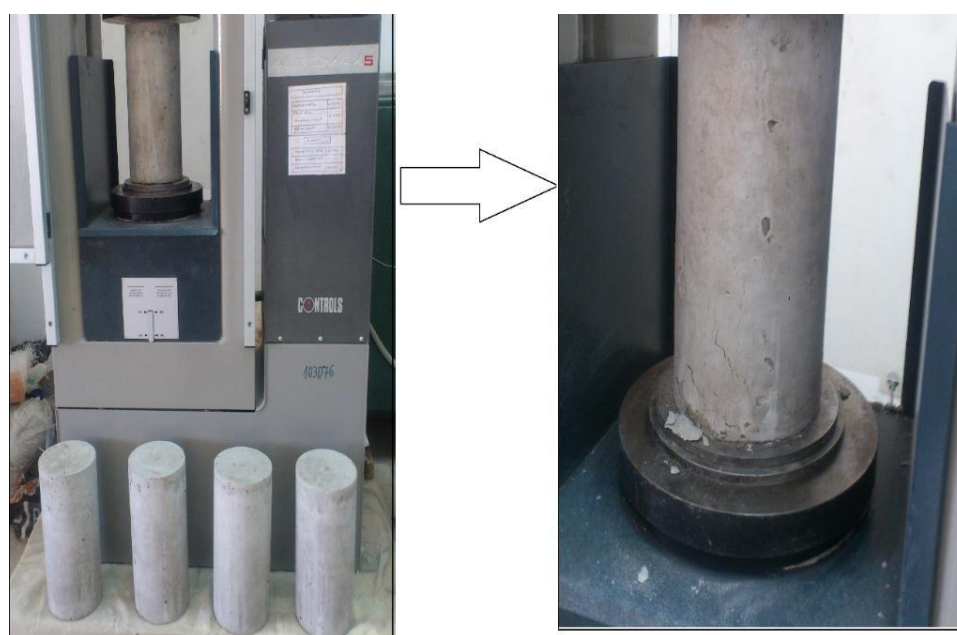


Figure II. 6. Essais de compression sur des éprouvettes en béton.

Chapitre II : Essais de Push-out sur des connecteurs en «I»

Le tableau II.2 donne les résultats des essais de compression. La résistance à la traction et le module élastique du béton ont été calculés selon le procédé proposé par Eurocode-2. [6]

*La résistance à la traction est obtenue à l'aide de la relation suivante :

$$f_t = 0.3 (f_{ck})^{(2/3)} \dots (2.1)$$

*Le module d'élasticité du béton est déterminé à l'aide de la relation suivante :

$$E_{cm} = 22000 ((f_{ck} + 8) / 10)^{0.3} \dots (2.2)$$

$$(E_{cm} \text{ En N/mm}^2 ; f_{ck} \text{ en N/mm}^2)$$

Spécimens	Classe de résistance du béton	Résistance moyenne à la compression f_{ck} (MPa)	Résistance à la traction f_t (MPa)	Module d'Young E_{cm} (MPa)
I-1a + I-1b	C20/25	25.89	2.63	31728.106
I-2a + I-2b	C30/37	34.27	3.17	330902.549
I-3a + I-3b	C20/25	25.89	2.63	31728.106

Tableau II. 1 : Caractéristiques mécaniques du béton.

b- Acier :

Les caractéristiques mécaniques de l'acier des connecteurs et l'acier des barres d'armature ont été également déterminées à partir des essais de traction réalisés sur des éprouvettes normalisées (Fig. II.7). Trois éprouvettes identiques en acier ont été découpées de l'âme du profilé métallique IPE80. Les dimensions des éprouvettes plates sont préparées selon la norme américaine ASTM de façon à respecter la relation entre la longueur de l'éprouvette et sa section transversale.

L'essai de traction consiste à exercer un effort de traction progressif sur une éprouvette en acier jusqu'à sa rupture à l'aide d'une machine de traction équipée d'un capteur de force de capacité égale à 120 KN. Le chargement a été appliqué lentement par incréments de charges jusqu'à la rupture de l'éprouvette. La durée de l'essai étant environ 15 minutes. Pendant chaque incrément de charge, l'allongement de l'éprouvette a été mesuré à l'aide d'un capteur de déplacement ayant une course de ± 20 millimètres. En plus, un enregistrement graphique mesure l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort de traction appliqué. On obtient un diagramme effort/allongement que l'on peut le convertir en (contrainte – déformation).

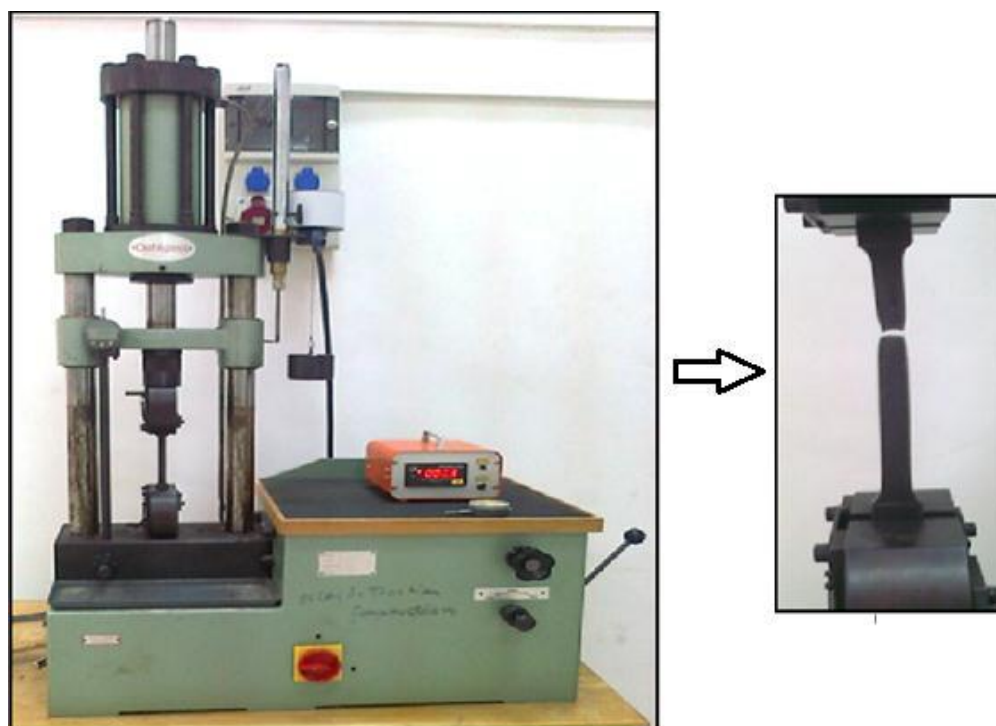


Figure II. 7. Essais de traction sur des éprouvettes en acier.

Comme pour l'acier des connecteurs, nous avons effectué des essais de traction sur trois éprouvettes identiques découpées des barres d'armature de diamètres Ø8 et de nuance S400.

Les résultats des essais de traction sont présentés dans le tableau II-3. Ce tableau inclut la résistance élastique moyenne, la résistance ultime moyenne et l'allongement relatif moyen.

Le profilé HEB160 a été choisi de nuance S355 (de résistance élastique conventionnelle à la traction égale à 355 MPa). Mais aucun essai n'a été réalisé sur ce profilé

Spécimens	Profilé	Grade d'acier	Résistance élastique moyenne f_y (MPa)	Résistance ultime moyenne f_u (MPa)	Allongement relatif moyen ε (%)
Acier des connecteurs en « I »	IPE80	S275	280	391	21
Acier des barres d'armature	Ø8	S400	417	608	13

Tableau II. 2: Caractéristiques mécaniques de l'acier.

II-1-3- Dispositif d'essai et instruments de mesure :

Les spécimens de « *Push-Out* » sont examinés sous un chargement monotone en utilisant une presse hydraulique menue d'un capteur de force de capacité égale à 600 KN. Une plaque épaisse en acier de 12 mm d'épaisseur a été placée sous les spécimens pour uniformiser les surfaces d'appui des blocs de béton. À l'extrémité supérieure des spécimens, une autre plaque en acier de 30 mm d'épaisseur a été placée sur le profilé métallique HEB160 pour distribuer les charges appliquées. Le chargement est appliqué lentement par incréments de charges de 5 KN jusqu'à l'apparition des fissures dans les blocs de béton et plus tard par incréments de 2.5 KN jusqu'à la charge maximale. Ensuite, le chargement est continué jusqu'à la rupture du spécimen. La durée de l'essai jusqu'à ce point étant environ 45 minutes. Pendant chaque incrément de charge, le glissement relatif entre le profilé et les blocs de béton, ainsi que leur séparation sont mesurés à l'aide de quatre capteurs de déplacement ayant une course de ± 20 millimètres placés au niveau des connecteurs en « I ». La (Fig. II.8) Montre un exemple de dispositif d'essai avec instruments de mesure.



Figure II. 8. Dispositif d'essai et instruments de mesure.

II-2- Résultats des essais de « Push-Out » :

Dans cette section, les principaux résultats des essais de cisaillement effectués sur des connecteurs en « I » sont rassemblés au tableau II-5 avec la description des modes de rupture observés et l'illustration des courbes (charge-glissement) obtenues en mettant sur l'abscisse le glissement moyen à l'interface (acier-béton) en millimètre et sur l'ordonnée la charge de cisaillement par connecteur en KN.

Spécimen N°	Connecteur en « I »			Bloc en béton		Résistance ultime du connecteur (KN)		Mode de rupture
	Profilé	H_u (mm)	L_u (mm)	f_{ck} (MPa)	Armature transversale	Essai	Moyenne	
I-1a	IPE80	80	60	25.89	4 Ø 8mm	80	82.5	Fissuration + écrasement du béton
I-1b	IPE80	80	60	25.89	4 Ø 8mm	85		
I-2a	IPE80	80	60	34.27	4 Ø 8mm	90	90	Cisaillement du connecteur
I-2b	IPE80	80	60	34.27	4 Ø 8mm	90		
I-3a	IPE80	80	80	25.89	4 Ø 8mm	107.5	110	Fissuration + écrasement du béton
I-3b	IPE80	80	80	25.89	4 Ø 8mm	112.5		

Tableau II. 3: Résultats des essais.

Les modes de rupture observés au cours des essais de push-out peuvent être classifiés en deux types, comme présenté dans le tableau II-5. Le premier mode de rupture est le cisaillement du connecteur. La caractéristique de ce mode de rupture était la plastification et puis le cisaillement de l'âme près de la semelle soudée du connecteur. La (Fig. II.9) montre le cisaillement du connecteur en « I » avec une fissuration remarquable du béton. Le deuxième mode de rupture est la fissuration et l'écrasement du béton dans la partie frontale du connecteur, comme illustré dans

la (Fig. II.10). Ce type de rupture est accompagné d'une déformation considérable du connecteur, comme montré à la (Fig. II.11).



Figure II. 9. Rupture par cisaillement de l'âme du connecteur.

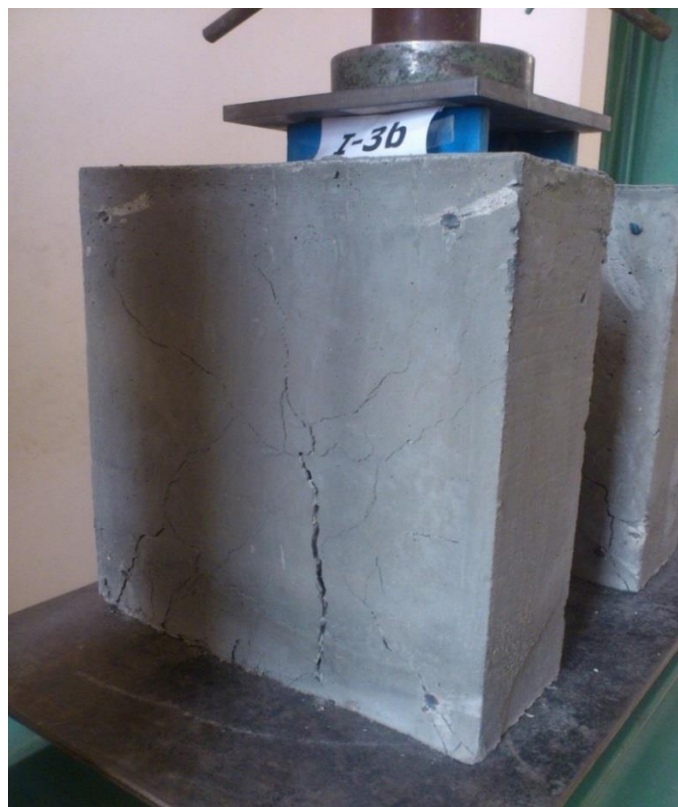


Figure II. 10. Rupture par fissuration et écrasement du béton.



Figure II. 11. Déformation du connecteur en «I».

Comme il est indiqué au tableau II.4, le cisaillement du connecteur est produit, particulièrement dans les spécimens de haute résistance du béton et/ou dans le cas des connecteurs de petite longueur. Cependant, dans les spécimens avec un béton de résistance modérée ou faible, la rupture des spécimens est provoquée par fissuration et écrasement du béton.

II-2-1- Courbes (charge – glissement) :

Les courbes (charge-glissement) des trios paires spécimens représentant les deux modes de rupture précédents sont indiquées à la (Fig. II.12). Le glissement à l'interface (acier-béton) augmente avec l'accroissement du chargement jusqu'à la charge maximale, ensuite, la charge diminue systématiquement jusqu'à la rupture. Pour le spécimen **I-2**, le cisaillement du connecteur en « I » a été identifié par un bruit et un abaissement brusque de la charge, et la séparation s'est produite d'un seul côté. Pour les spécimens **I-1** et **I-3**, la fissuration et l'écrasement du béton sont apparus aux alentours du connecteur avec un grand glissement

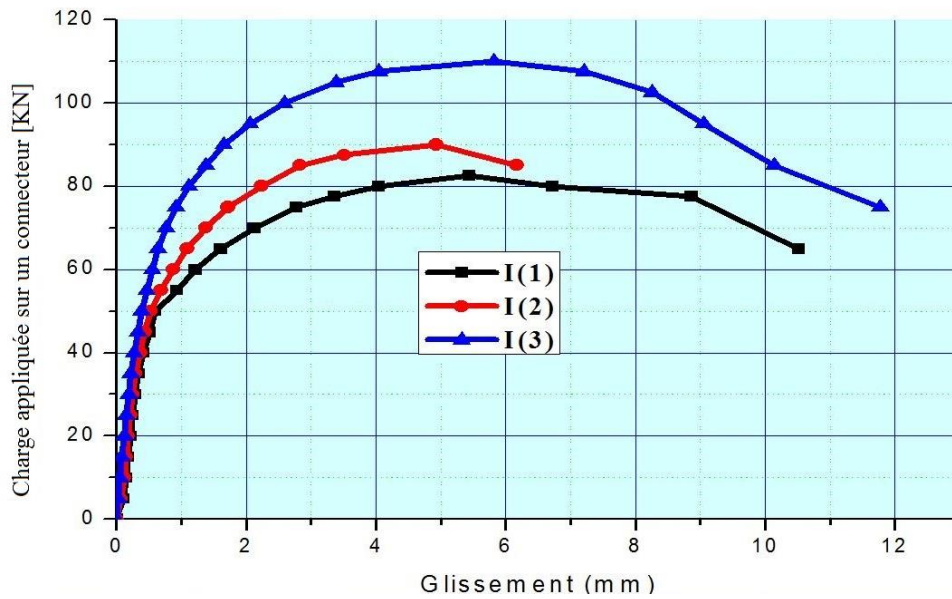


Figure II. 12. Courbes (charge-glissement) pour les spécimens I-1, I-2 et I-3.

II-3- Etude paramétrique :

II-3-1- Effet de la résistance du béton :

La (Fig. II.13) Présente les courbes (charge-glissement) pour les deux paires spécimens I-1 et I-2 qui sont identiques sauf que les valeurs de la résistance du béton à la compression sont 25.89 MPa et 34.27 MPa, respectivement.

La variation de la résistance du béton à la compression provoqué une augmentation de la charge de cisaillement du connecteur en « I » de (8.33%) approximativement.

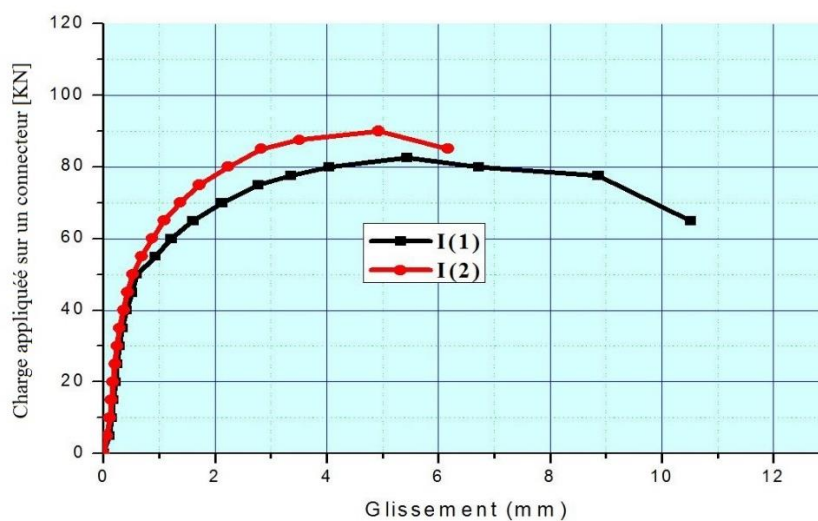


Figure II. 13. Effet de la résistance du béton.

II-3-2- Effet de la longueur du connecteur :

Les courbes (charge-glissement) pour les deux paires spécimens I-1 et I-3 sont montrées dans la (Fig. II.14). Ces spécimens sont semblables sauf que la longueur du connecteur dans les spécimens I-1 et I-3 varie de 60 mm à 80 mm respectivement. La hauteur des connecteurs utilisés dans ces spécimens est de 80 mm. La résistance à la compression du béton est de 25.89MPa.

Comme il est indiqué dans les courbes (charge-glissement), la résistance ultime du connecteur en « I » est influencée significativement par l'augmentation de la longueur du connecteur. En moyenne, la charge de cisaillement a augmenté approximativement de 33.33 % quand la longueur du connecteur a été variée de 60 mm à 80 mm.

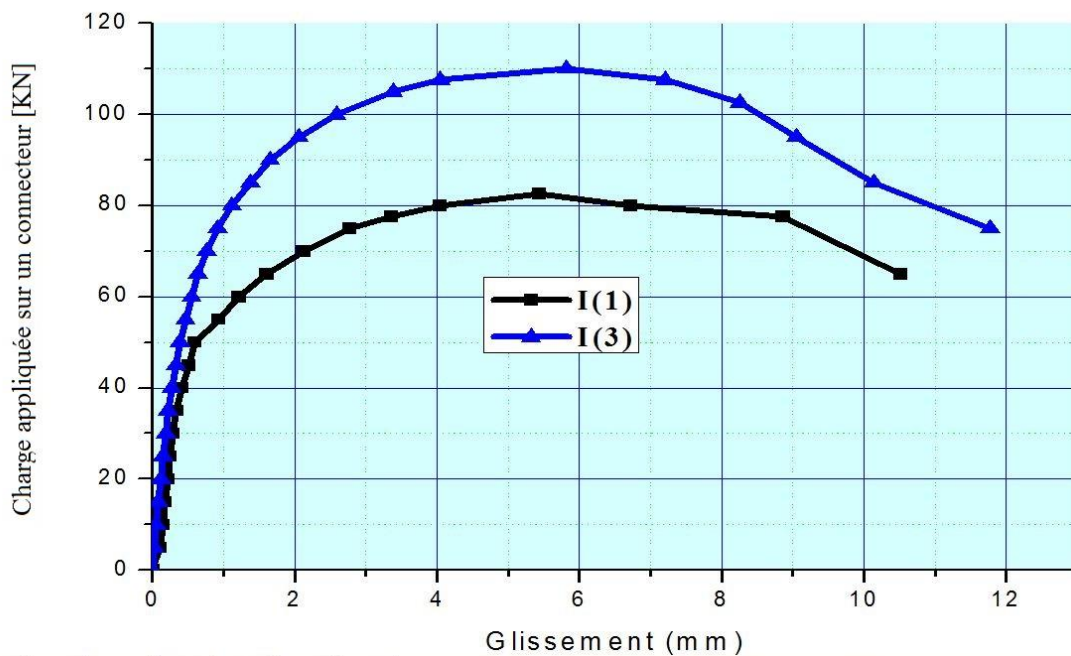


Figure II. 14. Effet de la longueur du connecteur.

II-4- Conclusion :

A la fin de ce chapitre on peut conclure les points suivants :

*Les modes de rupture observés au cours des essais de « *Push-Out* » peuvent être classifiés en deux types : le premier mode de rupture est le cisaillement du connecteur, tandis que le deuxième mode de rupture est la fissuration et l'écrasement du béton dans la partie frontale du connecteur. Le cisaillement du connecteur est produit, particulièrement dans les spécimens de haute résistance du béton et/ou dans le cas des connecteurs de petite longueur. Cependant, dans les spécimens avec un béton de résistance faible, la rupture des spécimens est provoquée par fissuration et écrasement du béton aux alentours du connecteur.

*Dans tous les spécimens testés, les valeurs de glissement à l'interface (acier-béton) ont été trouvées supérieures à 6 mm .Par conséquent, le connecteur en « I » peut être classifié selon l'Eurocode-4 comme un connecteur **ductile**.

* L'augmentation de la résistance du béton mène à une augmentation remarquable de la résistance ultime du connecteur.

* La résistance ultime du connecteur en « I » augmente significativement avec l'augmentation de la longueur du connecteur.

CHAPITRE III :

Modélisation par éléments finis de l'essai « *Push-Out* » sur un connecteur en « I »

Chapitre III : Modélisation par éléments finis de l'essai Push-Out

Introduction :

Dans ce chapitre nous allons simuler un modèle numérique tridimensionnel de l'essai « *Push-Out* » sur un connecteur en « I » pour déterminer la courbe charge/glissement et comparer les résultats théorique avec les résultats pratique. Cette simulation est effectuée par logiciel ANSYS version 12 [17], il permet l'utilisation de nombreux types d'éléments finis car il est conçu pour résoudre numériquement une large variété de problèmes mécaniques en modélisant le comportement mécanique des solides et des structures sous un chargement extérieurement appliqué. Ces problèmes incluent l'analyse statique/dynamique, structurale (linéaire et non linéaire), le transfert de chaleur, et les problèmes de la mécanique des fluides, aussi bien que des problèmes acoustiques et électromagnétiques voir ANNEXE A.

III-1- Etapes de la modélisation numérique :

D'une manière générale, la modélisation par éléments finis comporte les étapes qui seront citées ci-dessous. Il est à noter que chaque étape dépend de celui qui le précède.

- Définition des caractéristiques géométriques du modèle.
- Choix des types d'éléments finis à utiliser pour la modélisation.
- Définition des propriétés mécaniques des matériaux.
- Définition des maillages des éléments finis.
- Introduction des conditions aux limites et des charges
- Choix du paramètre pour l'analyse non linéaire (nombre d'incrimation, nombre maximal d'interaction, critères de convergences, etc...)
- Exécution du calcul.

Figure III. 1. Etapes pour l'élaboration d'un modèle d'éléments finis.

Il est proposé dans le présent travail, un modèle numérique basé sur le modèle en trois dimensions pour l'essai expérimental « *Push-Out* », sur un connecteur en « I » (Fig. III.2).

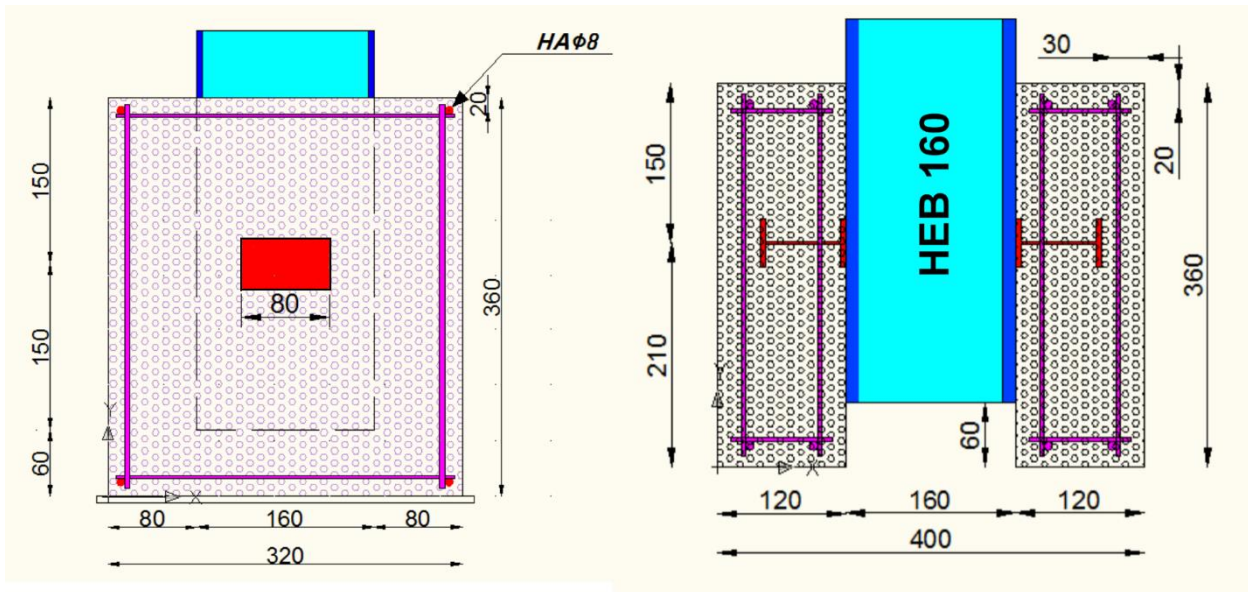


Figure III. 2. Epreuve d'essai Push-Out à modéliser.

Pour simuler des modèles expérimentaux avec l'axe de connecteur coïncidant avec l'axe correspondant de l'âme du profil, en utilisant seulement un quart du modèle global (Fig. III.3), cette étape est pour réduire le nombre des éléments finis.

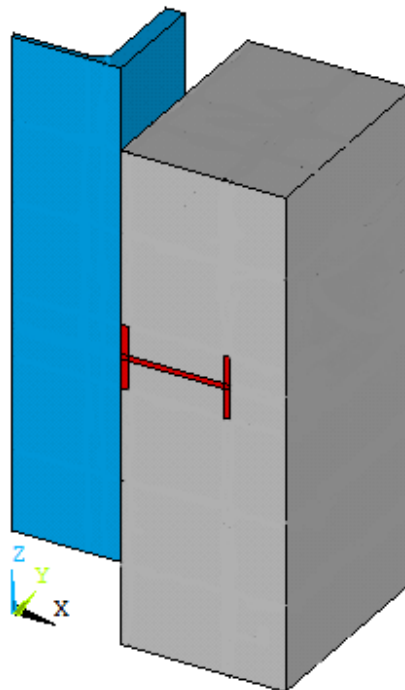


Figure III. 3. Un quart de l'épreuve « Push-Out ».

III-2- ÉLÉMENTS FINIS UTILISÉ :

Le code de calcul ANSYS possède une vaste bibliothèque d'éléments finis permettant à l'utilisateur d'utiliser des outils qui peuvent l'aider à résoudre des différents problèmes. Le choix des éléments de simulation numérique doit être fait en prenant compte des différents aspects, tels que la famille à laquelle appartient l'élément, les degrés de liberté, le nombre de nœuds et surtout, le comportement qui vient avant l'analyse désirée.

Pour le développement du modèle numérique, on a utilisé les éléments finis décrits aux points qui suivent :

III-2-1- Éléments finis Solid65 :

A été utilisé dans la discrétisation des pièces en béton. L'option pour cet élément si étant donné que la possibilité de simulation des effets situés comme, par exemple, la concentration des contraintes avec les connecteurs au cisaillement. L'élément SOLID65 est un élément tétraèdre, qui a huit nœuds, chaque nœud a trois degrés de liberté, c'est-à-dire des translations selon les axes x , y et z . Cet élément est en mesure de simuler le comportement de la fissuration du béton en traction et en écrasement en compression, ainsi que d'un comportement non-linéarité physique, ce qui permet d'évaluer les déformations plastiques. En outre, l'armature peut être incluse sous la forme d'homogénéisés, appelé armature dispersés, visés en l'espèce, selon l'axe Angles θ et ϕ , ou par l'utilisation d'éléments barre sur discrètement, cette procédure adoptée pour le modèle numérique de cet article.

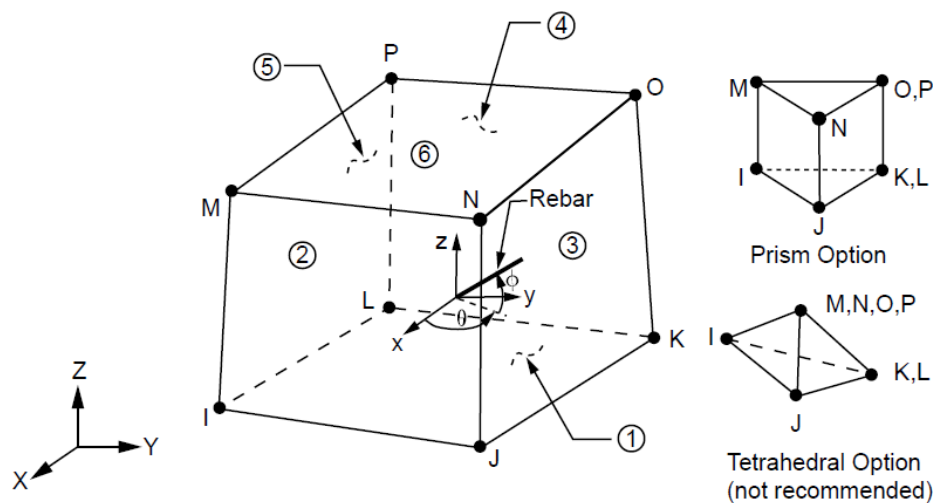


Figure III. 4. SOLID65 géométrie [17].

III-2-2- Éléments finis Solid45 :

Le profilé métallique a été simulé avec l'élément finis SOLID45. L'élément a la capacité de simuler la plasticité, fluage, enflure, durcissement de contrainte élevé et des grandes déformations déflexions. L'élément est défini par huit nœuds ayant trois degrés de liberté à chacun des directions x, y, et z, comme illustré à la (Fig. III.5).

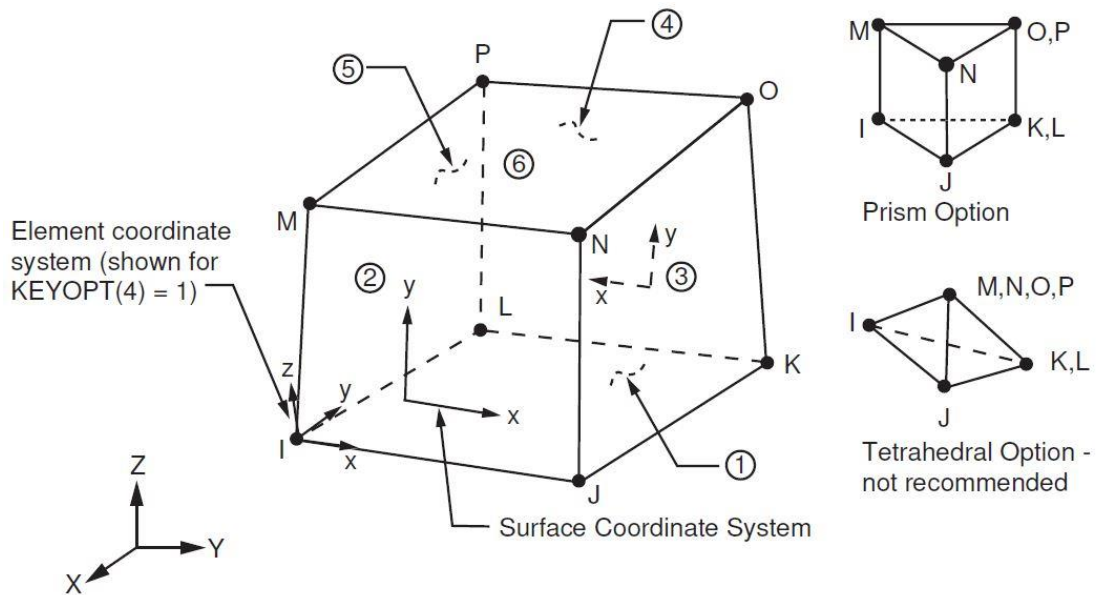


Figure III. 5. SOLID45 géométrie [17].

III-2-3- Link8 :

L'élément finis link8 a été utilisée dans la discrétisation de armatures en acier .Cet élément peut être utilisé pour modéliser des fermes, câbles affaissés, liens, ressorts, etc... L'élément 3D spar est un élément de traction-compression uniaxiale avec trois degrés de liberté à chaque nœud : translations suivant les directions x, y et z. Comme dans une structure de tige-joints, aucune déformation de l'élément n'est considérée.

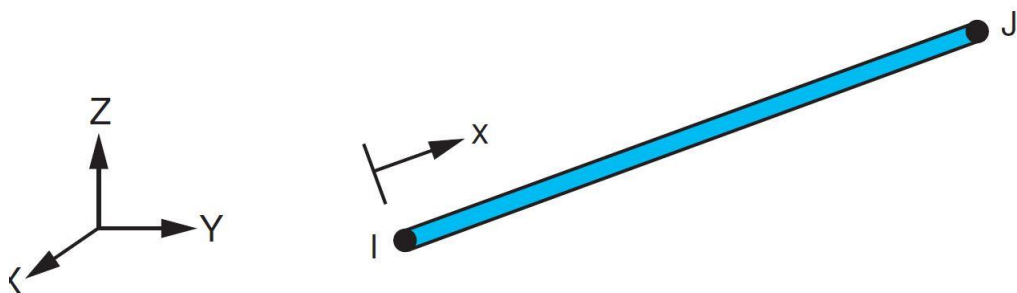


Figure III. 6. Link8 géométrie [17].

III-2-4- CONTA-173 & TARGE170 :

Un élément en trois dimensions non linéaire de surface à surface " contact paire " (CONTA-173 & TARGE170) a été utilisé pour modéliser le comportement non linéaire de l'interface Surface entre le béton et poutres en acier. Le contact pair se compose du contact entre deux limites, l'une des limites représente un contact, glissé et déformable La surface prise comme surface de contact (CONTA- 173 dans ANSYS) et l'autre représente rigide

La surface considérée comme une surface cible (TARGE - 170 en ANSYS). La (Fig. III.7) montre la géométrie (CONTA173 & TARGE170). Ces éléments de contact ont été utilisés avec surface de type superficie contacter capable de simuler l'existence de la pression entre les éléments, lorsqu'il y a contact, et séparation des éléments lorsqu'il n'y a pas de contact.

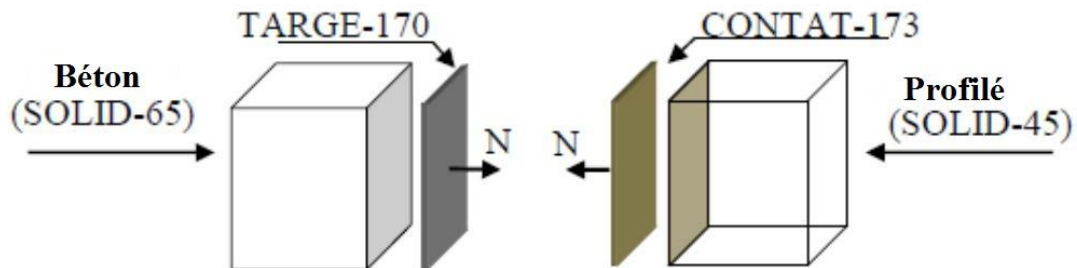


Figure III. 7. CONTA-173 & TARGE170. [15]

III-3- Propriétés mécaniques des matériaux :

Pour effectuer les calculs de dimensionnement et de vérification des constructions mixtes, il faut donner les caractéristiques principales des différents matériaux, à savoir le béton, l'acier d'armature et les aciers de construction :

III-3-1- Béton :

Comme chacun le sait, la particularité principale du béton est de ne pas présenter le même comportement en compression et en traction ; son comportement en traction est différent de celui en compression à cause de sa faible résistance à la traction. La (Fig. III.8) présente l'allure de la courbe expérimentale (contrainte-déformation) d'un béton normal ayant une résistance à la compression sur cylindre f_{ck} et une résistance à la traction f_{ctk} :

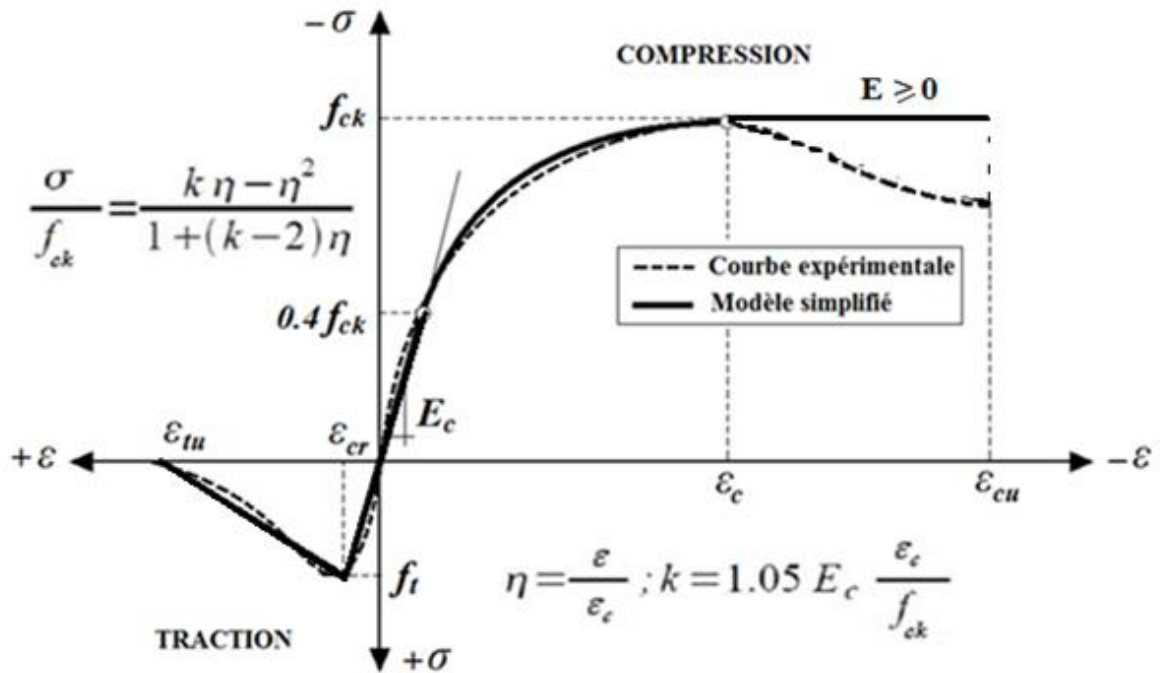


Figure III. 8. Diagramme contrainte – déformation d'un béton normal.

ϵ_c : Déformation correspondant à la résistance maximale f_{ck} ,

ϵ_{cu} : Déformation ultime correspondant à la rupture du béton comprimé,

E_c : Module d'élasticité.

f_t : Résistance à la traction $f_t = 0.3 (f_{ck})^{1/3}$.

Vu le comportement non linéaire du béton, le module d'élasticité doit être interprété comme un module sécant moyen pour les contraintes de courte durée notée E_c . Selon l'Eurocode 2, [6]

E_c peut être établi à l'aide de la relation suivante :

$$E_c = 22000 [(f_{ck} + 8)/10]^{1/3}.$$

Avec : (E_c en N/mm^2 ; f_{ck} en N/mm^2)

III-3-2- Acier :

Le modèle utilisé pour l'acier est un modèle élasto-plastique bilinéaire symétrique en traction et en compression comme illustré sur la (Fig. III.9).

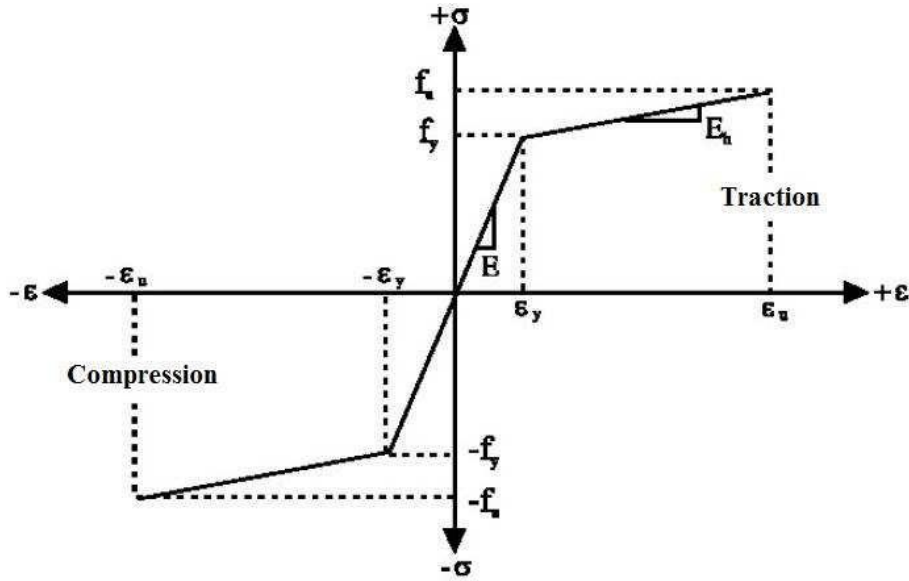


Figure III. 9. Diagramme bilinéaire de contrainte déformation de l'acier.

E : module d'élasticité,

f_y : Limite d'élasticité de l'acier,

f_u : Résistance ultime en traction et en compression,

ϵ_y : Déformation élastique,

ϵ_u : Déformation ultime en traction et en compression,

E_α : Module d'élasticité caractérisant la considération de l'écrouissage de l'acier.

III-4- Définition des maillages des éléments finis :

Le modèle conçu pour l'analyse numérique a été défini par quatre types d'éléments qui forment deux dalles de béton avec des renforts supplémentaires, comme la poutre d'acier, connecteurs au cisaillement et la paire du contact à l'interface de la dalle-poutre. Le maillage éléments finis développé pour tous les éléments de suivi la même méthodologie et le degré de raffinement présentée dans la (Fig. III.10) illustre le maillage éléments finis pour les composants cités, Lorsque (A) correspond à la dalle de béton, (B) la poutre en acier, (C) connecteurs au cisaillement. En choisissant un maillage fin au niveau du connecteur et devient de plus en plus grossier en s'éloignant du connecteur.

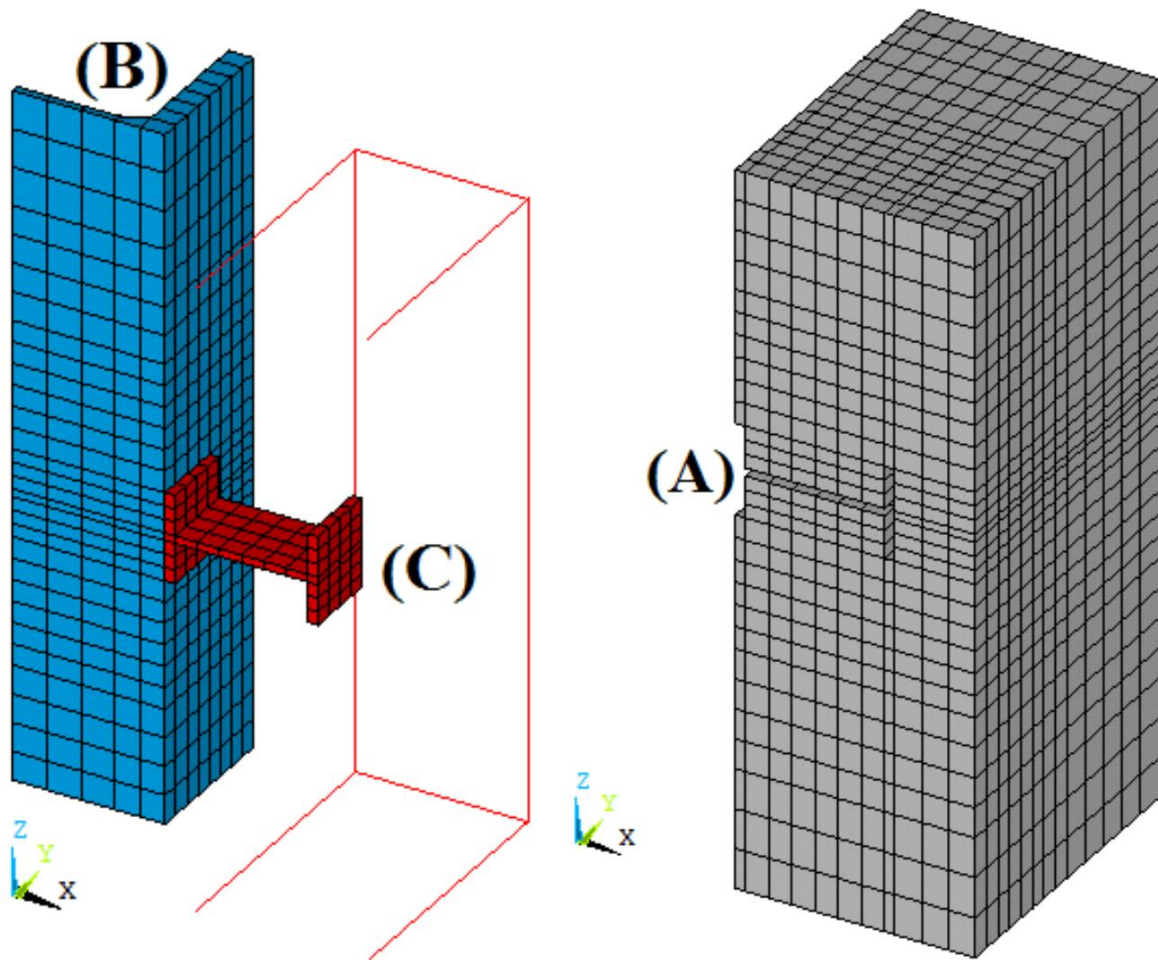


Figure III. 10. Groupes d'éléments finis : (A) dalle de Profil de béton, en acier (B), connecteurs de cisailment (C).

III-5- Conditions aux limites et l'application des charges :

III-5-1- Conditions aux limites :

Les conditions aux limites représentent des contraintes imposées sur la simulation numérique. Les nœuds à la base du bloc de béton sont bloqués dans la direction z pour traduire le fait que le bloc de béton repose sur une plateforme.

Par symétrie, on ne représente que le un quart de la structure modélisée, ceci implique que les nœuds du profilé par lesquels passe l'axe de symétrie sont bloqués horizontalement (dans la direction x), et les nœuds qui passe dans le plan de symétrie (xoz) sont bloqués dans la direction y

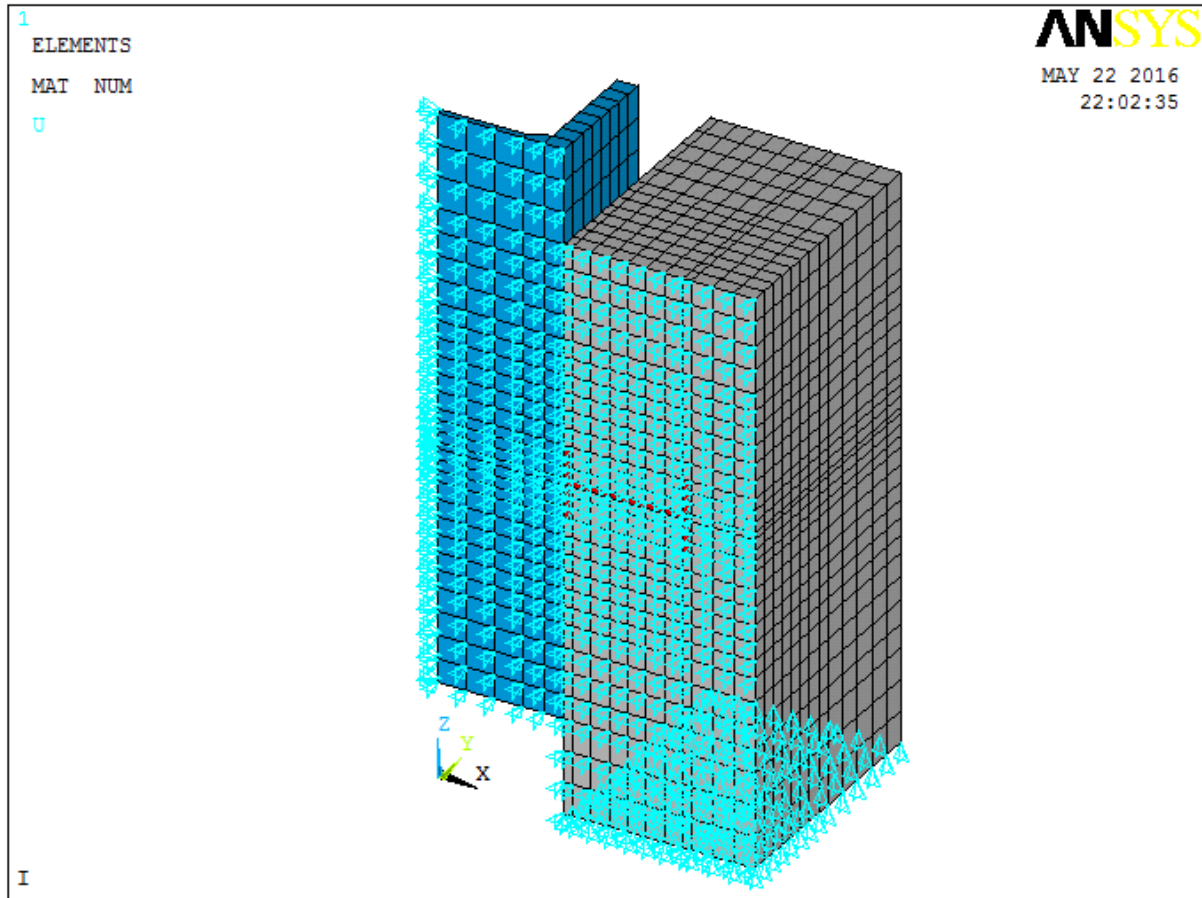


Figure III. 11. Maillage du modèle avec conditions aux limites.

III-5-2- Application des charges :

Comme illustré dans la (Fig. III.12), s'applique aux côtés du profilé métallique, sous forme de pression, conforme à celle identifiée lors de l'essai expérimental. L'intensité de la pression est définie au moyen de la relation entre la force de rupture estimée et la zone de la section transversale du profil métallique

ANSYS utilise l'approche de Newton-Raphson pour résoudre les problèmes non linéaires, caractérisée par l'actualisation de la matrice de la rigidité de la tangente à chaque itération.

Le programme est dirigé pour exécuter plusieurs solutions (substeps) pour appliquer la charge graduellement. À chaque substep, le programme exécutera un certain nombre d'itérations pour obtenir une solution convergée.

En outre, à chaque substep on peut obtenir un glissement correspondant à la charge appliquée. Par conséquent la courbe de charge/glissement peut être tracée.

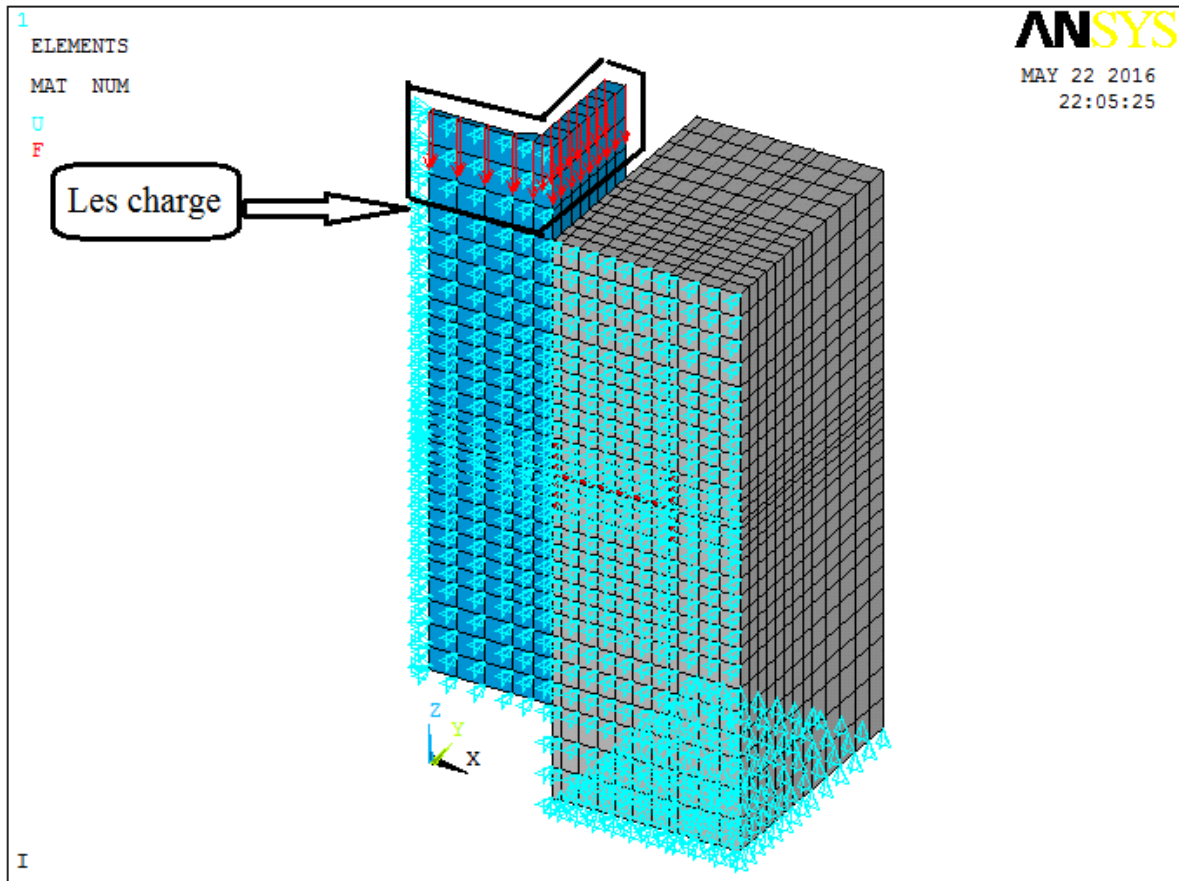


Figure III. 12. Le modèle numérique avec l'application des charges.

III-6- Exécution du calcul :

- Voici sa modélisation par éléments finis suivant notre modèle proposé :

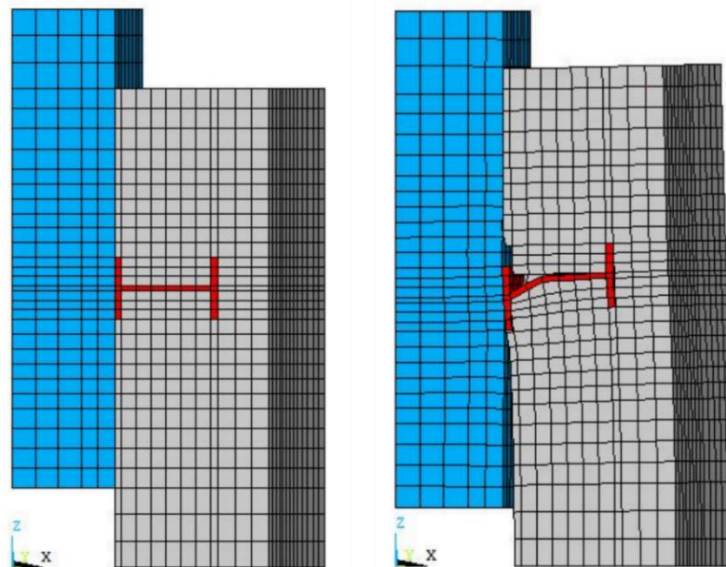


Figure III. 13. Modèle numérique avant et après appliquer la charge.

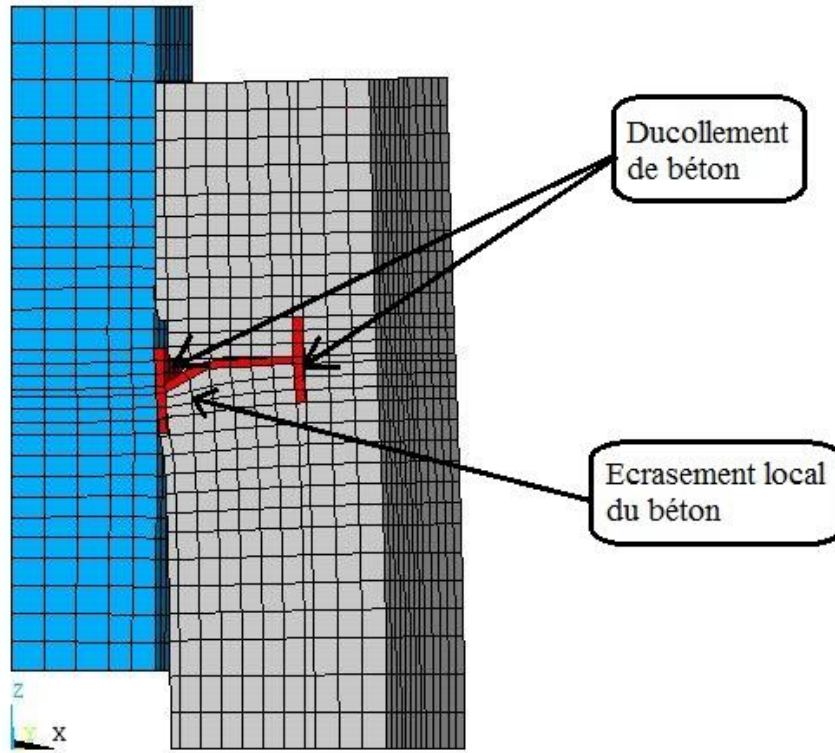


Figure III. 14. Déformation du connecteur.

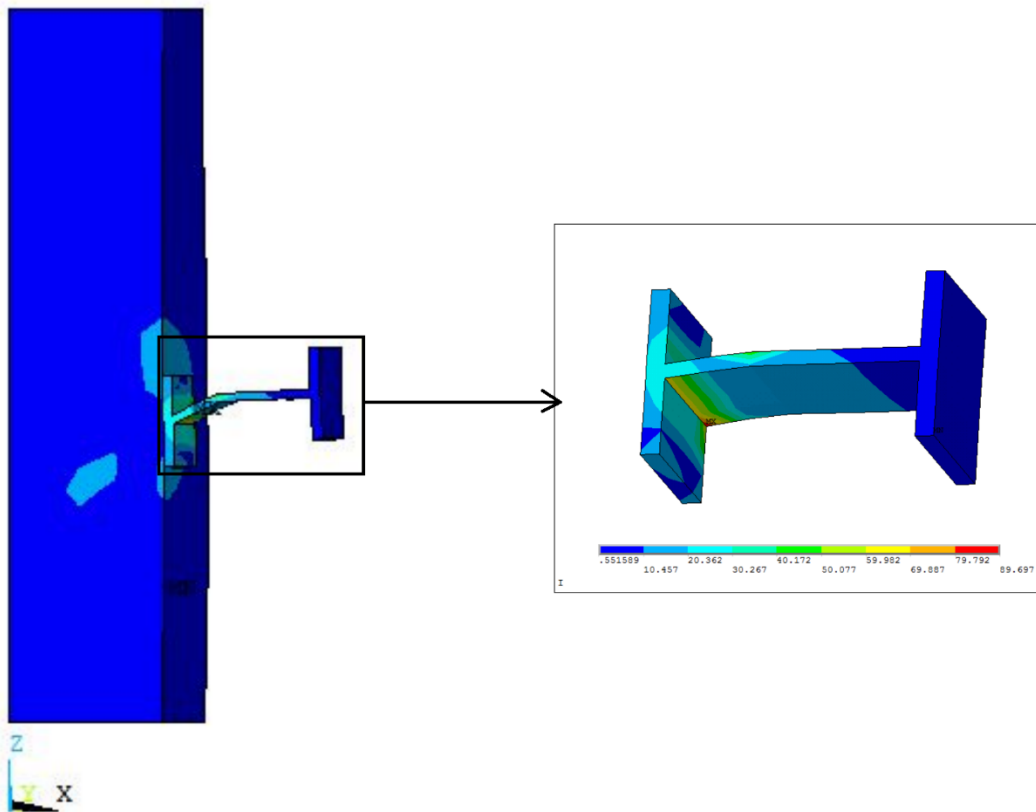


Figure III. 15. Distribution des contraintes de Von Mises.

La Figure (II.16) présente les courbes théorique et expérimentale (charge-glissement) qui traduit le comportement de l'éprouvette I-3.

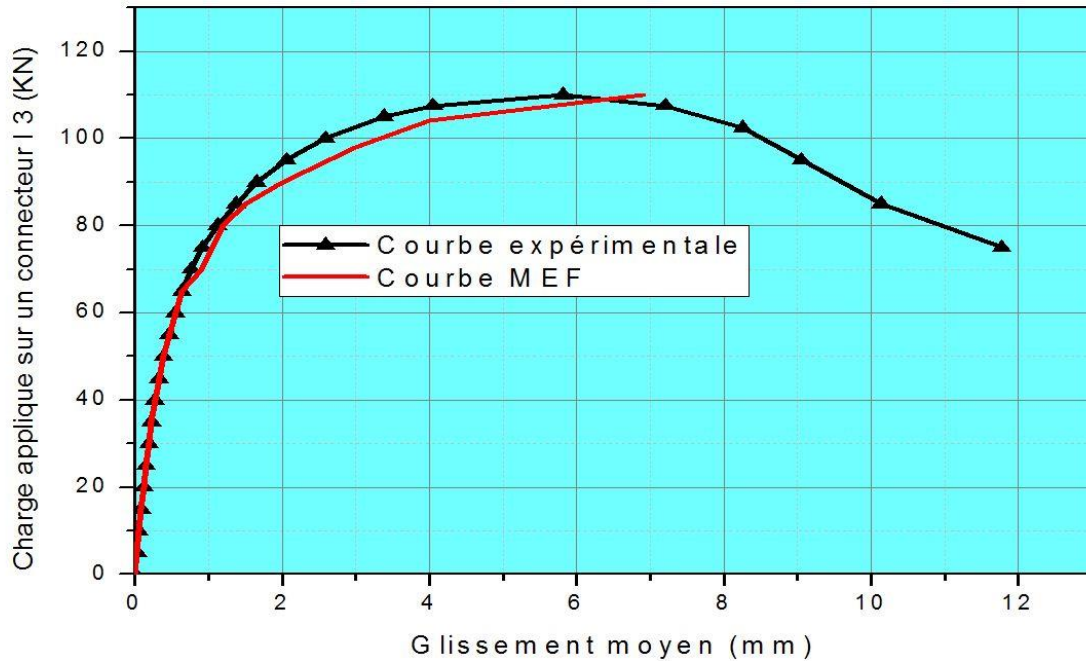


Figure III. 16. Les courbes théorique et expérimentale (charge-glissement) de l'éprouvette I-3.

III-7- Formulation de la résistance au cisaillement du connecteur en « I » :

En 1965, Driscoll et Slutter ont proposé une équation empirique pour prévoir la résistance au cisaillement d'un connecteur en « I » ancré dans une dalle pleine en béton. Cette expression a été modifiée pour pouvoir l'employer avec un béton léger et plus tard a été adoptée par le règlement américain AISC 2005 [3] (American Institute of Steel Construction specification) sous la forme suivante :

$$P_u = 0.3 (t_f + 0.5t_w) L_1 \sqrt{f_{ck} E_c} \dots\dots\dots (3.1)$$

Avec :

P_u : résistance ultime au cisaillement du connecteur en « I », en (N),

t_f : épaisseur de la semelle du connecteur en « I », en (mm),

t_w : épaisseur de l'âme du connecteur en « I » en (mm),

L_1 : longueur du connecteur en « I », en (mm),

f_{ck} : résistance caractéristique du béton à la compression, en (MPa),

E_c : module d'élasticité du béton, en (MPa).

Chapitre III : Modélisation par éléments finis de l'essai Push-Out

Le règlement canadien CSA [4] a suggéré également une équation semblable à l'équation précédente pour prévoir la résistance au cisaillement du connecteur en « I » :

$$P_u = 36.5 (t_f + 0.5t_w) L_l \sqrt{f_{ck}} \dots (3.2)$$

Pashan [14] a conclu que l'équation adoptée par le règlement canadien CSA est trop conservatrice. En incluant la hauteur du connecteur H_c comme paramètre, il a développé l'équation empirique suivante pour évaluer la résistance au cisaillement des connecteurs en « I » ayant une hauteur de 100 millimètres :

$$P_u = (336t_w^2 + 5.24L_l H_c) \sqrt{f_{ck}} \dots (3.3)$$

Le tableau III-1 donne une comparaison entre les valeurs de la résistance ultime du connecteur en « I » obtenues à partir des essais de push-out qui sont présentés dans le chapitre II et ceux calculés par les équations citées ci-dessus.

Spécimen N°	Résistance ultime du connecteur en « I » (KN)					$\frac{Test}{Eq. (3.1)}$	$\frac{Test}{Eq. (3.2)}$	$\frac{Test}{Eq. (3.3)}$
	Test	Moyenne	Eq. (3.1)	Eq. (3.2)	Eq. (3.3)			
I-1a	80	82.5	115.829	78.225	152.666	0.712	1.054	0.540
I-1b	85							
I-2a	90	90	430.336	90	298.753	0.209	1	0.301
I-2b	90							
I-3a	107.5	110	154.439	105.489	195.32	0.712	1.042	0.563
I-3b	112.5							

Tableau III. 1: Résistance au cisaillement des connecteurs en « I » - Comparaison.

D'après ce tableau, on a remarqué que la résistance au cisaillement du connecteur en « I » calculée par l'équation (3.2) est plus proche des résultats expérimentaux comparativement aux valeurs obtenues par les équations (3.1) et (3.3). Cependant, cette équation peut surestimer la résistance au cisaillement quand le mode de rupture intervient par cisaillement du connecteur. Par conséquent, une autre formule de résistance au cisaillement est nécessaire pour ce mode de rupture. Donc, la forme finale de l'équation adoptée est :

$$P_u = 36.5 (t_f + 0.5t_w) L_l \sqrt{f_{ck}} \leq A_{sc} f_u \dots (3.4)$$

A_{sc} : aire de l'âme cisailée du connecteur en « I », $A_{sc} = t_w L_l$

III-6 Conclusion :

Par le moyen du logiciel ANSYS, un modèle numérique tridimensionnel a été proposé pour simuler le comportement charge-glissement des connecteurs en IPE80 dans des éprouvette « *Push-Out* ». Nous avons modélisé le un quart du corps d'épreuve à cause de sa symétrie : le bloc en béton en SOLID65, le profil d'acier et le connecteur IPE80 en SOLID45 ainsi que les barres d'armature en LINK8.

- La simulation numérique a été effectuée de manière à reproduire le plus fidèlement possible l'essai « *Push-Out* » (géométrie, conditions aux limites, lois de comportement des matériaux et mode de chargement).
- A partir de cette simulation on tire les conclusions suivantes :
 - le modèle numérique par éléments peut remplacer la procédure expérimentale qui est difficile est couteuse.
 - à l'aide du modèle numérique, on peut effectuer plusieurs études paramétriques pour mettre en évidence l'influence de tous les paramètres importants.

Pour vérifier la validité du modèle proposé, nous avons effectué des essais de cisaillement qui seront détaillés dans le chapitre suivant.

Chapitr IV :
Étude paramétrique

Chapitre IV : Étude paramétrique

Introduction :

Dans notre chapitre on veut déterminer la capacité de glissement d'un connecteur en « I » à l'aide de simulation de l'essai de push-out avec logiciel ANSYS , en variant plusieurs paramètres pour estimer l'influence de ces derniers sur le comportement de connecteur en générale, pour cela, on a mené une étude paramétrique, cette dernière a pris en compte l'effet de la résistance caractéristique du béton , des dimensions du connecteur.

IV-1- MODELE ADOPTE :

Tout au long de ce chapitre, les simulations ont été effectuées avec le modèle numérique qui est détaillé dans le chapitre précédent.

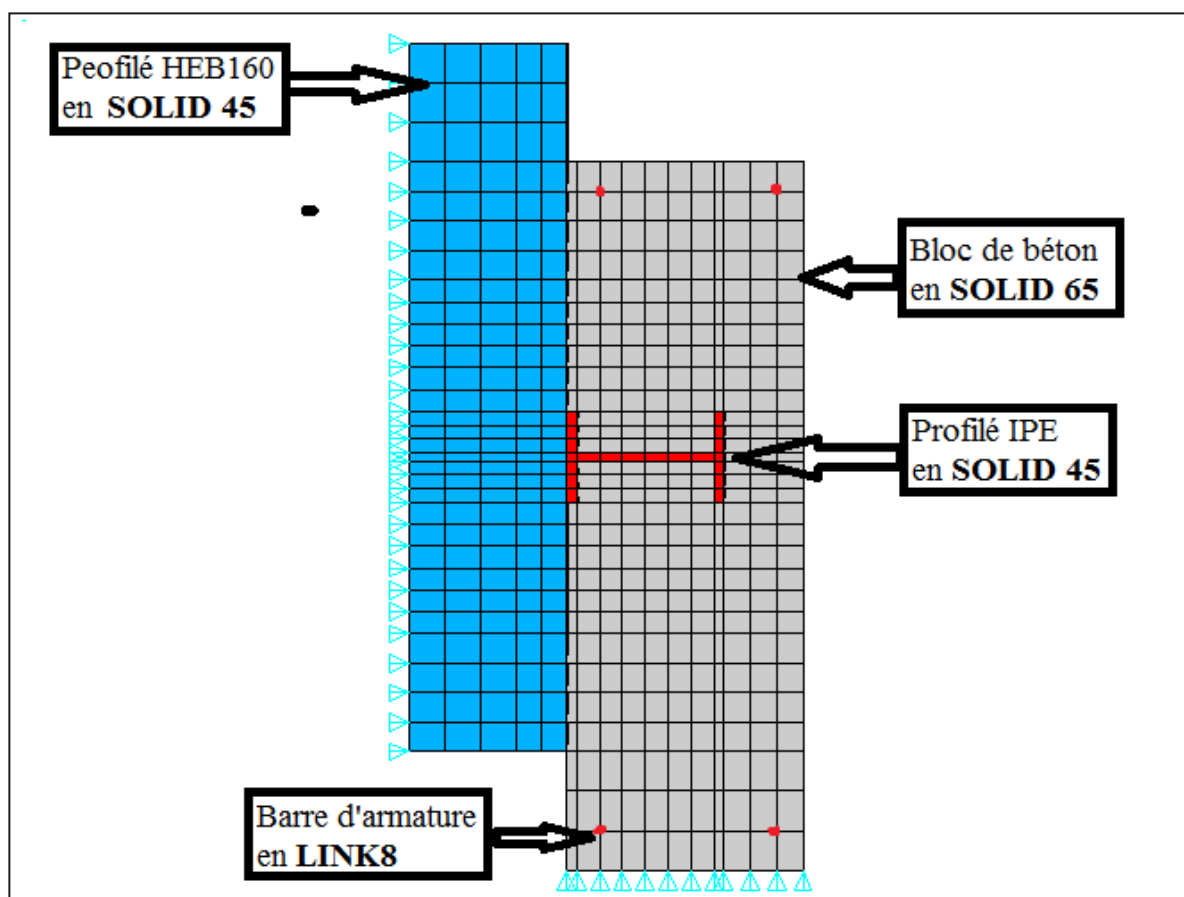


Figure IV. 1. Modèle utilisé pour l'étude paramétrique.

IV-2- Effet de la résistance caractéristique du béton :

Nous allons faire varier la résistance du béton d'un pas de 5 N/mm², et représenté les courbes (charge-glissement) pour faire la description sur l'effet de la résistance de béton f_{ck}

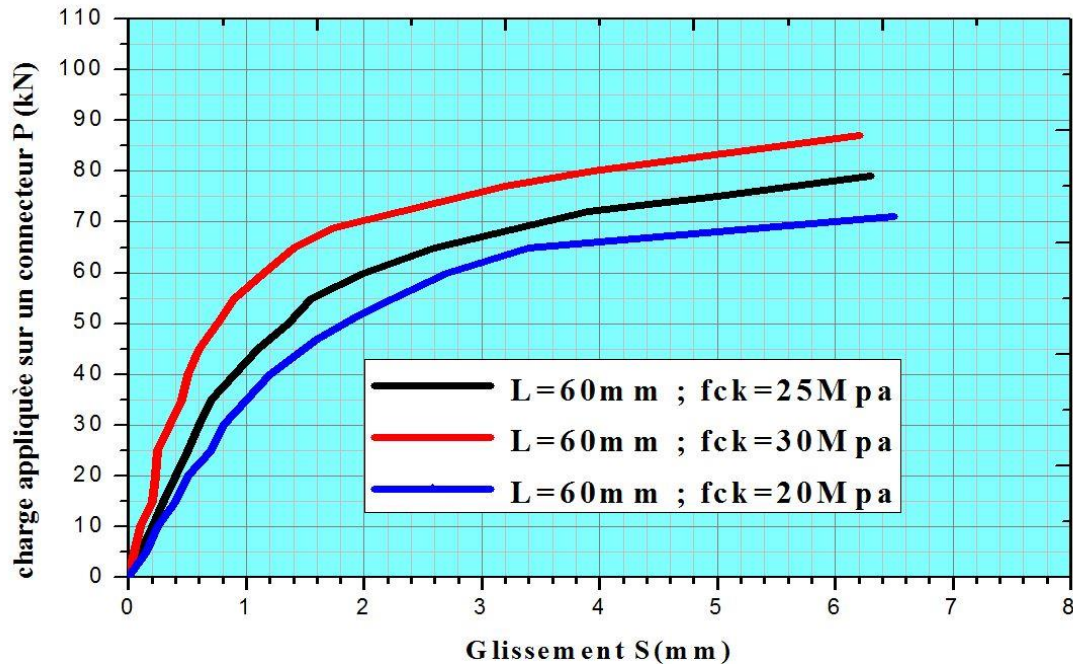


Figure IV. 2. Effet de la résistance de béton f_{ck} .

IV-2-1- Commentaire :

On a observé que la résistance du connecteur augmente proportionnellement avec l'amélioration de la résistance du béton à la compression.

Et enfin après effectuer les essais « *Push-Out* », nous avons conclu essentiellement que la capacité de glissement de cette connexion est supérieure à 6 mm selon [EUROCODE 4], donc le connecteur peut être classé **ductile**, cette capacité de glissement est suffisante pour effectuer un calcul plastique de la connexion.

IV-3- Effet de la largeur des connecteurs (L_I) :

La résistance de connecteur varie aussi en fonction de la largeur du connecteur. Pour que nous puissions noter cet effet de la largeur, nous allons faire varier sa valeur avec un incrément de 10mm.

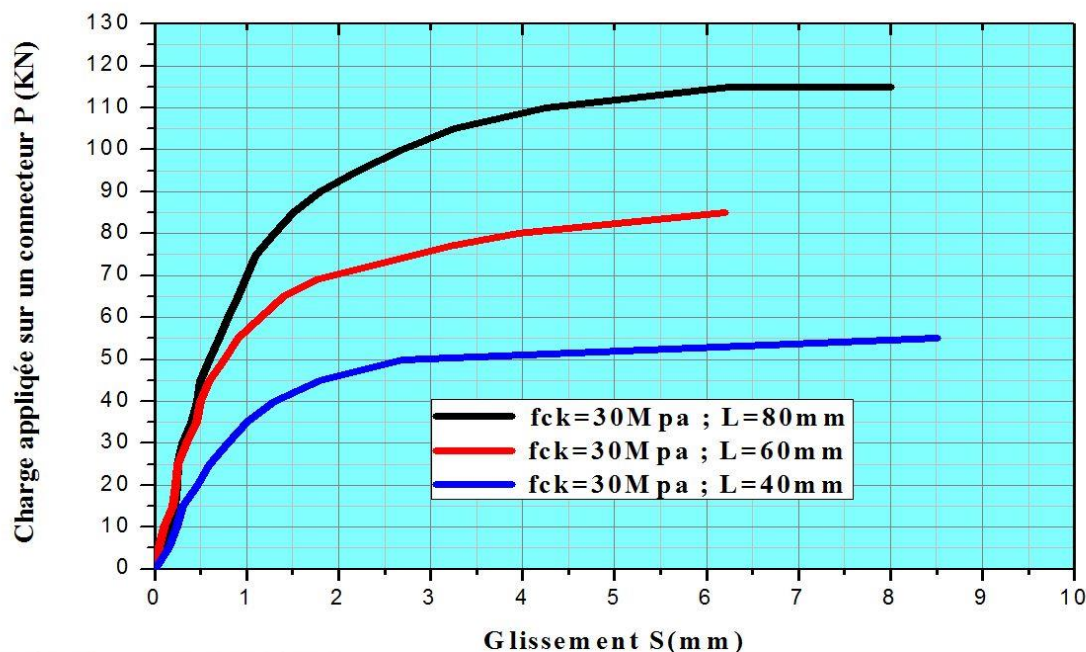


Figure IV. 3. Effet de la largeur des connecteurs L_I .

IV-3-1- Commentaire :

On remarque que l'augmentation des deux courbes (2 et 3) s'accélère à la proche des forces maximale ($P_{u2}=85$ KN, $P_{u3}=115$ KN), Au-delà les valeurs de la charges diminuent jusqu'à la plastification du connecteur correspondance avec les valeurs de glissement suivant ($S_2=6.2$ mm, $S_3=8$ mm) et pour la courbe (1) la force maximale ($P_{u1}=55$ KN), Au-delà la valeur de la charge diminue jusqu'à la cisaillement du connecteur avec glissement égale à ($S_1=8.5$).

Et enfin nous avons conclu que :

Lorsque la largeur (L_I) du connecteur augmente, la résistance au cisaillement augmente aussi.

IV-4- Conclusion :

Partant de l'expression de la résistance à l'effort de cisaillement des connecteurs en « I », nous avons tirés quelques paramètres à étudier tels que : la résistance caractéristique du béton, les dimensions du connecteur (largeur).

L'étude paramétrique a été réalisée par simulation numérique de modèles tridimensionnels avec le code de calcul ANSYS. Elle a permis de quantifier l'influence des différents paramètres du modèle sur la résistance et notamment le glissement des connecteurs en « I ». Elle a mis en évidence les principaux éléments suivants :

- L'influence sur le glissement, donc sur la résistance à l'effort rasant, de la résistance caractéristique du béton à la compression est généralement favorable. Ce qui revient à dire que la résistance au cisaillement d'un connecteur dépend de la résistance caractéristique du béton.
- Il existe une dépendance entre la résistance P_u (sous forme de glissement) et les dimensions du connecteur (la largeur). Cette dépendance est due au fait que le connecteur en « I » reprend l'effort de cisaillement sous forme de butée.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de recherche avait pour objectif de présenter l'essai « *Push-Out* » effectué sur les connecteurs « I » afin de déterminer leur résistance au cisaillement, leurs modes de ruines et leurs lois de comportement (cisaillement-glissement). Le but était de proposer un modèle d'éléments finis tridimensionnel pour la simulation du comportement au cisaillement d'un connecteur type « I » dans un spécimen d'essai « *Push-Out* ».

Pour cela, comme point de départ, une large recherche bibliographique a été réalisée, se référant au sujet en question, visant à étudier la connexion acier-béton dans les poutres mixtes à travers les essais standard de cisaillement « *Push-Out Tests* ».

Grâce à cette recherche bibliographique, nous avons pu comprendre que :

- les connecteurs, dont leur rôle est primordial car sans eux il n'y a pas de collaboration entre la section en acier et la dalle de béton, peuvent être qualifiés par leur degré de connexion et d'interaction. Cela implique que le calcul de la connexion dans les poutres mixtes de bâtiment et de pont doit être réalisé avec soin (type, nombre et espacement des connecteurs) ;
- ces connecteurs peuvent être ductiles ou rigides selon la capacité de glissement du connecteur concerné ;

dans le but d'évaluer la résistance ultime au cisaillement, le mode de ruine et la courbe cisaillement-glissement un essai dit « *Push-Out* » peut être envisagé.

Ensuite, un modèle numérique a été proposé afin de simuler l'essai « *Push-Out* » sur des connecteurs en « I ». La simulation a été effectuée, par le moyen du code de calcul ANSYS version 12, de manière à reproduire le plus fidèlement possible cet essai (géométrie, types d'éléments finis, maillage, conditions aux limites, lois de comportement des matériaux et mode de chargement). Une courbe cisaillement/glissement a été tracée par la suite et le modèle proposé a été validé en comparant cette courbe aux résultats expérimentaux.

Notre travail s'est poursuivi en faisant une étude paramétrique du comportement de ces connecteurs toujours par le moyen de simulation avec le logiciel ANSYS et cela a montré l'influence de plusieurs paramètres :

- cette résistance à l'effort rasant varie proportionnellement avec la résistance caractéristique du béton à la compression ;
- cette même résistance augmente aussi avec la largeur du connecteur et cela s'explique par le fait qu'elle reprend l'effort de cisaillement sous forme de butée ;

CONCLUSION GÉNÉRALE

- La simulation par éléments finis montre que les glissements sont toujours moyens et par conséquent le connecteur en « I » peut être classé comme un connecteur ductile.

Perspectives

Les recherches présentées dans cette étude touchent à une problématique vaste :

- la réalisation des essais expérimentaux de type « *Push-Out* » sur d'autres connecteurs ;
- la modélisation d'une poutre mixte de pont dont la connexion est assurée par des connecteurs en « I » afin d'observer son comportement global.
- le béton utilisé dans les poutres mixtes est hétérogène et sa fissuration est souvent inévitable. Donc, au lieu d'utiliser un béton ordinaire, on utilise un béton de fibre, il permet de réduire davantage la fissuration du béton. Actuellement, il n'y a pas assez de recherches menées dans cette direction, cette voie reste à explorer.

Certes, le connecteur idéal n'est pas encore connu à l'heure actuelle. Nos études seront poursuivies dans la perspective de trouver un connecteur caractérisé par une géométrie simple, facile à poser et possédant un comportement parfaitement ductile traduite par une capacité de glissement importante induite par une charge élevée.

Si l'objectif de la construction mixte est d'économiser les matériaux utilisés sans modifier la résistance, il faut avoir à l'esprit que le connecteur recherché doit être

Références bibliographiques :

- [1]- **A. M. Ibrahim and Q. W. Ahmed**, “*nonlinear analysis of simply supported composite steel - concrete beam*,” vol. 06, no. 03, pp. 107–126, 2013.
- [2]- **A. Mazoz, A. Benanane, and M. Titoum**, “*Push-out Tests on a New Shear Connector of I-shape*,” vol. 13, no. 3, pp. 519–528, 2014.
- [3]- **AISC (2005)**. *Specification for structural steel buildings*. AISC-360-05, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.
- [4]- **AISC-360-05**, *American Institute of Steel Construction, Chicago, IL*. CAN/CSA-S16-01 (2001). *Limit states design of steel structures*. Canadian Standard Association, Toronto, Ontario, Canada
- [5]- **D. L. David**, “*Design and experimental analysis of a new shear connector for Steel and concrete composite structures*,”.
- [6]- **Eurocode 2 (2005)**. **Eurocode 2** : *Design of concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*. ENV 1992-1-1, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [7]- **Eurocode 4 (2005)**. **Eurocode 4** : *Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1 : General rules and rules for buildings*. EN 1994-1-1, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [8]- **G. Moacyr, S. Alva, E. Orientador, and M. Malite**, “*ESTRUTURA MISTA AÇO-CONCRETO*,”. Université de São Carlos.2000.
- [9]- **Hirt M, Bez R.**, *Traité de génie civil - Construction métallique*, “*Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement*” - Volume 10 ; Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1996.
- [10]- **Hirt M., Crisinel M.**, *Traité de génie civil - Charpentes métalliques*, “*conception et dimensionnement des halles et bâtiments*”, Volume 11 ; Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2001
- [11]- **I. Valente and R. H. Fakury**, “*Viga mista de aço e concreto constituída por perfil formado a frio preenchido*.”. Université de São Carlos.2009.
- [12]- **J. Bujnak and J. Bujnak**, “*Analyse globale de poutres mixtes acier béton : approche analytique et modélisatrice* SCIENCES POUR L'INGÉNIEUR DE CLERMONT-FERRAND Thèse

Présentée par Jan Bujnak SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL Analyse globale de poutres mixtes acier béton- Approche analytique et modélisation non linéaire,”. Université de Zilina.2007.

[13]- **L. Chater**, “ *Estudo numérico e experimental de conectores de cisalhamento feitos de vergalhão ca-50 para uso em estrutura mista aço-concreto* “ .Université de Brasília.2015.

[14]- **Pashan, A. (2006)**. *Behaviour of channel shear connectors : push-out tests*. MSc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Saskatchewan, Canada.

[15]- **T. Bachir**, “ *Analyse Expérimentale de la Connexion Acier-Béton dans les Structures Mixtes,*”. Université Mentouri Constantine.2011.

[16]- **T. I. Kotinda**, “ *Modelagem numérica de vigas mistas aço-concreto simplesmente apoiadas : ênfase ao estudo da interface laje-viga,*” Université 2006.

[17]- **Swanson Analysis Systems, ANSYS**. Online manual, version 12. and Theory Reference

Annexe A

1- Description d'ANSYS :

Le logiciel ANSYS a été développé par Dr. John Swanson, fondateur de la société ANSYS Inc. qui a son siège à Houston, PA, USA. Il s'agit d'un outil de développement en analyse d'ingénierie. La méthode utilisée est celle des éléments finis. Il est utilisé dans des domaines allant de l'automobile et l'électronique à l'aérospatiale et la chimie. Le logiciel ANSYS permet la modélisation de structures, produits, composants ou systèmes et d'étudier leurs réponses physiques telles que les niveaux de contraintes, les distributions de température ou l'effet de champs électromagnétiques.

2- Interface utilisateur :

L'interface utilisateur est basée sur l'environnement X windows conjointement à OSF/Motif. La partie graphique est interactive et permet la visualisation 3D, incluant les gradients, les isosurfaces, les flux de particules et les coupes de volumes. Il est possible de générer des images en postscript, HPGL ou TIFF.

3- Préprocesseur :

La phase de préprocesseur est celle où sont spécifiées les données. L'utilisateur peut choisir le système de coordonnées et le type d'éléments, définir des constantes et des propriétés de matériaux, créer des modèles solides et les mailler, ainsi que définir des équations de couplage et contraintes. L'utilisateur peut aussi exécuter un programme qui lui indiquera la taille des fichiers générés, la mémoire nécessaire, le temps d'exécution et le wavefront nécessaire. Le maillage peut être de 3 types :

- maillage conforme (seulement des briques)
- maillage libre (tétraédrique)
- maillage adaptatif (itératif)

4- Solveur :

Le type d'analyse sélectionné détermine les équations qui seront utilisées par le solveur. Les catégories disponibles incluent :

- structure, thermique, champ EM , champ électrique ,électrostatique ,fluides ,acoustique
- champs couplés : ceci signifie qu'il est possible de résoudre simultanément plusieurs aspects (par exemple, la thermo-mécanique, l'hydro-mécanique, la thermo-fluidique, etc).

Annexe A

Chaque catégorie peut encore inclure différents types d'analyses spécifiques (statique ou dynamique, etc.). Dans le simulateur ANSYS [4] utilisé dans nos travaux, il existe différents algorithmes de résolution pour traiter les problèmes à éléments finis. On peut citer deux classes de méthodes :

- Les méthodes de résolution directes,
- Les méthodes itératives (gradient conjugué par exemple).

5- Les méthodes de résolution directes :

Ces méthodes aboutissent à la solution en un nombre fini d'opérations. Elles sont adaptées au mode de stockage de la matrice $[K]$. Si cette matrice est symétrique, la méthode de décomposition de Choleski est généralement utilisée. Si elle ne l'est pas, les logiciels recourent à la méthode d'élimination de Gauss. Les méthodes directes sont employées pour des systèmes de taille moyenne (inférieure à quelques milliers d'inconnues). Le temps de calcul est sensiblement proportionnel au nombre d'inconnues.

6- Les méthodes itératives :

Dans ce cas, la solution approchée est atteinte en un nombre infini d'opérations convergeant vers la solution analytique. Ces méthodes intègrent donc un critère d'arrêt, lorsque la solution approchée est suffisamment proche de la solution analytique. Si le système à résoudre est:

$$[K]\{U\} = \{B\}$$

Alors, l'algorithme de résolution cherche à diminuer le résidu $\|R\|$, qui s'écrit :

$$\|R\| = \|[K]\{U_i\} - \{B\}\|$$

Où est la solution approchée du problème à l' i ème itération. Suivant le type de méthode itérative, la norme $\|X\|$ peut être la norme euclidienne ou la norme du maximum. De plus, la plupart des algorithmes sont basés sur la descente du gradient : faire évoluer les $\{U_i\}$ dans le sens de

$-\text{grad}(\|R\|)$. Le critère d'arrêt est soit :

$$\|R\| < \varepsilon_1$$

Soit $\|U_i - U_{i-1}\| < \varepsilon_2$. Le choix de ε_1 ou ε_2 dépend de ce que l'on considère comme petit. Les méthodes itératives sont employées pour des systèmes de grande taille, où le traitement par la méthode directe serait prohibitif en termes de temps de calcul. Finalement, ce type de méthode est un compromis entre l'exactitude et le coût de calcul.

Annexe A

7- Post processeur :

C'est la phase où l'utilisateur peut manipuler les résultats de la phase précédente et les visualiser interactivement ou faire des sauvegardes pour impression et/ou video.

8- Conclusion :

Cette partie a permis de fournir au lecteur un panorama général des concepts et notions propres au traitement des problèmes thermiques. Tout d'abord, l'origine des différents phénomènes de transfert de la chaleur a été abordée. A ce sujet, notons que dans le cadre de nos travaux, seul les transferts thermiques par conduction et par convection seront traités. En effet, c'est les principaux modes de transfert de chaleur qui existe entre les enceintes de stockage de liquide cryogéniques et le milieu environnant. Par conséquent, une analyse thermique numérique sera préférable pour estimer la répartition de la température d'une structure. Il existe de nombreuses méthodes d'analyse numérique, parmi lesquelles on peut citer la méthode des éléments finis. Celle-ci correspond à la méthode utilisée par notre simulateur de référence (ANSYS). Seules les principales étapes de base ont été exposées; à partir de l'exemple du traitement de l'équation de la chaleur. En effet, il s'agissait uniquement d'exposer la démarche générale, la terminologie et les concepts qui seront nécessaires à la bonne compréhension des travaux ultérieurs.