



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 الشهيد الشيخ العربي التبسي – تبسة

Université Chahid Cheikh Larbi Tébessi – Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Civil

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **Master Académique**

**En** : Génie Civil

**Spécialité** : Structures

**Par** : Salhi Nada

**Sujet**

**Vérification à l'arrachement des connecteurs de cisaillement dans les poutres mixtes acier-béton**

Présenté et soutenu publiquement, le 07/06/2023 devant le jury composé de :

**Dr : Labed. A**

**Dr : BOURSAS. F**

**Mr : Salhi. M**

...

Maitre de conférences B

Maitre de conférences B

Maitre- Assistant A

...

Promotion : 2022/2023

Président

Rapporteur

Examineur

...

## Remercîment

Je tiens en premier à remercier le bon Dieu qui m'a donné  
Volonté, force, patience, courage et santé pour réaliser ce  
Travail jusqu'à sa fin.

Mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à mon  
Encadreur Docteur **Boursas Farid** d'avoir proposé ce thème et dirigé mon travail.

Tous mes respects aux membres du jury qui me feront l'honneur  
D'accepter ce modeste travail.

Je tiens à exprimer un remerciement tout spécial à mes parents,  
mes chères sœurs pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de mes études.

Tous mes amis et amies, celles et ceux qui d'une manière ou d'une  
Autre m'a aidé et soutenu,

Enfin, mes remerciements les plus profonds a tous ceux qui m'ont  
Soutenu et aidé pendant la réalisation de ce travail

## **Dédicace**

Je dédie ce modeste travail a :

Mes chers parents.

Mes sœurs.

Toute la famille.

La promotion M2 STRUCTURES,

Toutes les promotions de génie civil de l'année 2022-2023.

Tous mes amis.

Et à tous ceux qui me sont chers

## Résumé

Les poutres composites acier-béton sont couramment utilisées dans la construction en raison de leur résistance élevée et de leur durabilité. Cependant, la connexion entre la poutre en acier et la dalle de béton est essentielle pour assurer l'intégrité structurelle globale. La connexion doit non seulement résister aux forces de cisaillement et limiter le déplacement entre les deux matériaux, mais elle doit également offrir une résistance aux forces d'arrachement, qui peuvent causer une traction du connecteur. L'Eurocodes 4 fournit des directives pour la conception et les tests de connecteurs de cisaillement afin de s'assurer qu'ils répondent aux exigences nécessaires en matière de résistance à l'arrachement. Le code spécifie que les nouveaux connecteurs de cisaillement doivent être testés à l'aide d'un test d'arrachement dite « pull out test » et doivent fournir une résistance à l'arrachement d'au moins 10 % de la résistance au cisaillement sous des efforts de traction. Dans cette étude, nous avons étudié les performances de deux types de connecteurs de cisaillement : les goujons à tête et les connecteurs en IPE perforés avec une barre d'anti-soulèvement passant par le trou circulaire perforé. Les connecteurs ont été simulés à l'aide du code à base des éléments finis Abaqus sous des forces d'arrachement pour évaluer leur résistance à la traction. Les résultats ont montré que les deux types de connecteurs offraient une résistance adéquate aux forces d'arrachement, les goujons à tête étant légèrement plus performants que les connecteurs en IPE perforés avec une barre d'anti-soulèvement. Cependant, les deux types de connecteurs ont dépassé l'exigence minimale de 10 % de la résistance au cisaillement lors de l'arrachement, comme spécifié par l'Eurocodes.

**Mots clés** : structures composites ; connecteurs de cisaillement ; connecteurs IPE perforé, Goujon à tête, essai Pull out ; courbe charges soulèvement. ; Analyse non linéaire ;

## ملخص:

تستخدم الكمرات المركبة من الحديد والخرسانة المسلحة بشكل شائع في البناء بسبب قوتها العالية ومتانتها. ومع ذلك، فإن الاتصال بين الكمرات الفولاذية واللوح الخرساني أمر بالغ الأهمية لضمان السلامة الهيكلية الشاملة للنظام. يجب ألا يقاوم الارتباط قوى القص ويحد من النزوح بين المادتين فحسب، بل يجب أن يوفر أيضاً مقاومة لقوى الانسحاب العمودي، مما قد يتسبب في تعرض الموصل للشد. يوفر Eurocodes إرشادات لتصميم واختبار موصلات القص للتأكد من أنها تلبى المتطلبات اللازمة لمقاومة الانسحاب العمودي. يحدد الكود أنه يجب اختبار موصلات القص الجديدة باستخدام اختبار السحب العمودي ويجب أن توفر ما لا يقل عن 10 بالمائة من مقاومة القص في إطار جهود الشد. في هذه الدراسة، قمنا بالتحقيق في أداء نوعين من موصلات القص: براغي ذات الرأس وموصلات IPE محفورة مع سيخ مضاد للرفع يمر عبر الثقب الدائري ل IPE. تمت محاكاة الموصلات باستخدام برنامج العنصر المحدود ثلاثي الأبعاد Abaqus تحت قوى السحب لتقييم مقاومة الانسحاب العمودي. أظهرت النتائج أن كلا النوعين من الموصلات يوفران مقاومة كافية لقوى الانسحاب، مع أداء براغي ذات الرأس بشكل أفضل قليلاً من موصلات IPE المثقبة بقضيب مضاد للرفع. ومع ذلك، فقد تجاوز كلا النوعين من الموصلات الحد الأدنى المطلوب البالغ 10 في المائة من مقاومة القص أثناء الارتفاع، كما هو محدد في Eurocodes.

**الكلمات المفتاحية:** الهياكل المركبة؛ موصلات القص موصل قص IPE مثقوب؛ براغي ذات الرأس؛ اختبار الانسحاب العمودي؛ منحنى رفع - الحمل، تحليل غير خطي.

## **Abstract**

Steel-concrete composite beams are commonly used in construction due to their high strength and durability. However, the connection between the steel beam and the concrete slab is critical for ensuring the overall structural integrity of the system. The connection must not only resist shearing forces and limiting displacement between the two materials, but it must also provide resistance to pullout forces, which can cause the connector subjected to tension. The Eurocodes provides guidelines for the design and testing of shear connectors to ensure that they have the necessary requirements for pullout resistance. The code specifies that new shear connectors must be tested using a pull-out test and should provide at least 10 percent of the shear resistance under tensile efforts. In this study, we investigated the performance of two types of shear connectors: headed studs and IPE preformed connectors with an anti-uplift rebar passing through the circular perforated hole. The connectors were simulated using 3D finite element code Abaqus under pull-out forces to evaluate their uplift resistance. The results showed that both types of connectors provided adequate resistance to pullout forces, with the headed studs performing slightly better than the IPE connectors perforated with an anti-uplift rebar. However, both types of connectors exceeded the minimum requirement of 10 percent of the shear resistance during uplift, as specified by the Eurocodes.

**Keywords:** composites structures; shear connectors; IPE performed connectors; headed studs; pull-out test; load-uplift curve.

## Table de matière :

<b>Remercîment .....</b>	<b>I</b>
<b>Dédicace .....</b>	<b>II</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>III</b>
<b>:ملخص .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>V</b>
<b>Liste des figures : .....</b>	<b>IX</b>
<b>Liste des tableaux : .....</b>	<b>XI</b>
<b>Liste des symboles .....</b>	<b>XII</b>
<b>INTRODUCTION GENIRALE .....</b>	<b>27</b>
<b>Introduction générale.....</b>	<b>2</b>
<b>CHAPITRE 1 : Étude bibliographique sur les connecteurs de cisaillement dans les poutres composites acier-béton .....</b>	<b>27</b>
1. Introduction : .....	5
1.2. Comportement des poutres composites : .....	5
1.2.1. Comportement non composite : .....	5
1.2.2. Comportement entièrement composite : .....	6
1.2.3. Comportement partiellement composite : .....	7
1.3. Classification des connecteurs de cisaillement : .....	7
1.3.1. Connecteurs en cisaillement ductiles : .....	8
1.3.2. Connecteurs en cisaillement non ductiles : .....	8
1.4. Modes de rupture des poutres mixtes avec connecteurs de cisaillement : .....	9
1.5. Essai sur les connecteurs de cisaillement : .....	10
1.5.1. Essai de cisaillement « Push-Out » : .....	10
1.5.2. Essai de cisaillement « pull out »: .....	11
1.5.3. Essai de cisaillement sur poutres : .....	12
1.5.4. Essai de cisaillement direct : .....	13
1.6. Travaux de recherches sur la résistance à l'arrachement des connecteurs de cisaillement : .....	14
1.6.1. Étude numérique sur la performance en traction du goujon à tête avec section endommagée : .....	14
1.6.2. Etude paramétrique de connecteurs de cisaillement en forme de I avec différentes orientations : .....	15

1.6.3. Connecteurs de cisaillement perforés sur poutres mixtes sous chargement monotone : .....	16
1.6.4. Forces d'arrachement dans les poutres mixtes avec de grandes ouvertures (2013) : .....	17
1.6.5. Comportement des goujons sous charges combinées de cisaillement et de traction :.....	18
1.6.6. Étude paramétrique sur la capacité de cisaillement des trous circulaires et des trous longs de connecteur du cisaillement perforé : .....	20
1.6.7. Capacité de résistance à l'arrachement d'un nouveau cisaillement Perforé pour renforcement de chapeau de pieu en acier (2016) :.....	21
1.6.8. Étude expérimentale sur le comportement des connecteurs de cisaillement perforé avec trous long cranté : .....	22
1.6.9. Etude Expérimentale et Paramétrique sur la résistance d'un connecteur de cisaillement Perforé entaillé :.....	23
Les paramètres étudiés sont :.....	23
1.6.10. Évaluation expérimentale de nouvelles formes de connecteurs de cisaillement en U :.....	24
1.6.11. Étude expérimentale sur des connecteurs démontables soumis au Cisaillement-traction combinés : .....	25
1.12. Conclusion : .....	26
<b>CHAPITRE 2 : Modélisation numérique des essais Pull out.....</b>	<b>27</b>
2.1. Introduction :.....	27
2.2. Généralités sur la modélisation de l'essai pull out : .....	27
2.3. Caractéristique géométrique et mécaniques des modèles étudiés :.....	28
2.4. Modélisation des matériaux :.....	31
2.4.1. Modèle du béton : .....	31
représenter son comportement non linéaire.....	31
2.4.2. Comportement élastique du béton :.....	32
2.4.3. Le modèle plasticité-endommagement (CPD) :.....	32
2.4.4. Paramètres de plasticité retenus :.....	36
2.5. Modélisation des éléments en acier :.....	37
2.5.1. Type d'éléments finis et maillage :.....	37
2.5.2. Conditions d'interaction et de contacts : .....	39
2.6. Chargement et conditions aux limites :.....	40
2.7. Méthode d'analyse :.....	41



2.8. Résultats numériques :.....	41
2.10. Conclusion :.....	44
<b>CHAPITRE 3 : Vérifications et Interprétation des résultats.....</b>	<b>45</b>
1. Introduction :.....	46
1.1. Résultats de la simulation numérique : .....	46
1.2. Travail expérimental sur la résistance au cisaillement et à l'arrachement des goujons à tête et IPE perforé :.....	49
1.3. Vérifications de la résistance à l'arrachement des connecteurs étudiés : .....	54
1.4. Comparaison des résistances à l'arrachement obtenues par rapport à la formule analytique proposée dans la littérature et les règlementations : .....	55
1.5. Conclusion :.....	56
<b>CHAPITRE 4 : Etude paramétrique .....</b>	<b>58</b>
1.Introduction : .....	59
2.Les paramètres étudiés :.....	59
2.1.IPE perforé : .....	60
3.1.Goujon à tête :.....	63
3.Conclusion :.....	68
Conclusion Générale .....	70
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :.....	72

## Liste des figures :

Figure 1. 1 Comportement non composite des poutres mixtes .....	6
Figure 1. 2 Comportement entièrement composite des poutres mixtes[1] .....	6
Figure 1. 3 Comportement partiellement composite des poutres mixtes [4]. .....	7
Figure 1. 4 Classification des connecteurs de cisaillement.....	9
Figure 1. 5 Spécimen de l'essai de push-out selon EUROCODE 4[9].....	11
Figure 1. 6 Principe de l'essai Pull out et exemple de montage .....	11
Figure 1. 7 Essai de cisaillement sur poutre [13] .....	13
Figure 1. 8 Courbes expérimentales d'un essai de cisaillement direct .....	14
Figure 1. 9 Dommages aux connecteurs de cisaillement des goujons à tête .....	15
Figure 1. 10 échantillons push-out testés. ....	16
Figure 1. 11 Exemples de connecteurs de cisaillement. ....	17
Figure 1. 12 Mise en place de tests d'arrachement.[17] .....	19
Figure 1. 13 Trou circulaire et trou long de la nervure perforé .[18].....	20
Figure 1. 14 Renforcement des têtes de pieux en acier à l'aide des connecteurs de cisaillement perforé .[19] .....	21
Figure 1. 15 Configurations des connecteurs perforés.....	22
Figure 2. 1 Connecteurs de cisaillement Etudiés .....	27
Figure 2. 2 Restes des composants du modèle éléments finis .....	28
Figure 2. 3 détails des éprouvettes arrachées .....	29
Figure 2. 4 caractéristiques géométriques des éprouvettes .....	30
Figure 2. 5 relation contrainte-déformation du béton pour une analyse non linéaire EN 1992-1-1[9].....	33
Figure 2. 6 courbe contrainte-déformation sous une charge de compression unie axiale .....	34
Figure 2. 7 Modèles de traction du béton (a) linéaire (b) bilinéaire (C) exponentiel .....	35
Figure 2. 8 Relation contrainte-déformation pour les connecteurs en I, l'acier de construction et les armatures [24].....	37
Figure 2. 9 Maillage en éléments finis du spécimen pull out .....	38
Figure 2. 10 Maillage de la base rigide, le connecteur en IPE80, la barre d'anti soulèvement et les armatures du premier modèle .....	38
Figure 2. 11 Maillage de la base rigide, le goujon à tête et les armatures du second modèle .....	39
Figure 2. 12 Contact sans frottement entre la dalle en béton et les connecteurs de cisaillements.....	40
Figure 2. 13 Contact intégré ( <i>Embedded constraints</i> ) entre la dalle en béton et les armatures .....	40
Figure 2. 14 Chargement appliqué au spécimen pull out.....	40

Figure 2. 15 Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux pour les connecteurs goujons à tête .....	42
Figure 2. 16 Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux pour les connecteurs en IPE80 perforé avec une barre d'anti soulèvement .....	42
Figure 3. 1 modèle du goujon a tête.....	47
Figure 3. 2 modèle IPE perforé .....	48
Figure 3. 3 Courbes de l'essai Push out des goujons testés par Zhao fei Lin[17] .....	49
Figure 3. 4 Courbes de l'essai Pull out des goujons testés par Zhao fei Lin[17].....	50
Figure 3. 5 modes de rupture .....	50
Figure 3. 6 Courbe charge-glissement pour IPE6C .....	51
Figure 3. 7 Courbe charge-glissement pour IPE8C .....	51
Figure 3. 8 Fissuration et éclatement du béton .....	52
Figure 3. 9 Courbe charge-séparation du connecteur IPE80 avec armature de 6 mm et trou circulaire.....	52
Figure 3. 10 Courbe charge-séparation du connecteur IPE80 avec armature de 8 mm et trou circulaire.....	53
Figure 3. 11 Fissuration et éclatement du béton .....	53
Figure 4. 1 Influence de la résistance à la compression de béton.....	60
Figure 4. 2 Influence de la nuance d'IPE80.....	61
Figure 4. 3 Influence de la résistance des armatures.....	62
Figure 4. 4 Influence du diamètre des trous et de la barre d'armatures passant par le trou.....	63
Figure 4. 5 Influence de la résistance à la compression du béton.....	64
Figure 4. 6 Influence de classe du goujon.....	65
Figure 4. 7 Influence du diamètre du goujon.....	66
Figure 4. 8 Influence de la hauteur .....	67
Figure 4. 9 influence du diamètre de tête du goujon.....	68

## Liste des tableaux :

Tableau 2. 1 propriétés physiques du béton.....	30
Tableau 2. 2 Propriétés de l'acier de construction, des barres d'armature et du goujon de tête.....	30
Tableau 2. 3 propriété des matériaux sur connecteurs IPE perforé .....	31
Tableau 2. 4 Paramètres de plasticité.....	36
Tableau 2. 5 Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux .....	43
Tableau 3. 1 La différence force de deux connecteurs.....	54

## Liste des symboles

$\varepsilon_c$  : déformation élastique

$\varepsilon_s$  : déformation ultime en traction et en compression

$\varepsilon_{slip}$  : déformation après glissement

Prd: effort résistant au cisaillement des connecteurs à tête soudée dans les dalles pleines

$d$  : diamètre de la tige du connecteur de cisaillement en mm

$h_{sc}$  : hauteur du connecteur de cisaillement

$f_u$ :résistance ultime à la traction du connecteur de cisaillement

$f_{ck}$ :caractéristique de compression du cylindre

$f_t$ : résistance du béton à la traction

$E_c$ : module d'élasticité du béton

$\gamma_v$ : coefficient partiel de sécurité pour la résistance au cisaillement

$b_o$ : largeur effective de la dalle

$n_r$ : nombre de goujons par nervure

$h_p$ : hauteur du platelage profilé métallique

$A_{fl}$  : aire de la face frontale du connecteur

$a_0$  : Épaisseur d'origine d'une éprouvette plate ou épaisseur de paroi d'un tube

$L_c$ : Longueur parallèle

$L_0$  : Longueur de jauge d'origine

$L_t$ : Longueur totale de l'éprouvette

$S_0$  : Section transversale d'origine de la longueur parallèle

$P_{test}$  : effort résistant ultime obtenu expérimentalement

$\Delta_{test}$  : déplacement ultime obtenu expérimentalement

$E_{cm}$ : module d'élasticité du béton utilisé dans la modélisation numérique

$f_{cm}$ : valeur moyenne de la résistance à la compression du cylindre de béton

$\sigma_c$ : Contrainte de compression du béton

$f_{sy}$ : valeur de la limite d'élasticité utilisée pour la modélisation par éléments finis des connecteurs de cisaillement en I

$f_{su}$  : résistance ultime à la traction utilisée pour la modélisation par éléments finis des connecteurs de cisaillement en I

$f_u$  : résistance ultime en traction et en compression de l'acier  $f_y$  : limite d'élasticité de l'acier

$L$  : longueur des connecteurs

$n$ : coefficient d'équivalence ( $n = E_a / E_c$ )

$t_f$ : épaisseur de la semelle du connecteur en « I »

$t_w$ : épaisseur de l'âme du connecteur en « I »

$\varepsilon_y$ : déformation élastique du connecteur

$\varepsilon_{su}$ : déformation ultime en traction et en compression du connecteur

$\nu$ : coefficient de Poisson

$E_a$ : module d'élasticité longitudinal de l'acier de construction

$E_c$ : module d'élasticité longitudinal du béton

$E_s$ : module d'élasticité longitudinal de l'acier d'armatures

$H$  : hauteur du connecteur

$\eta$ : degré de connexion,

# **INTRODUCTION GENIRALE**

### Introduction générale

Les structures composites d'acier et de béton sont utilisées dans l'industrie de la construction depuis les années 1920, et sont considérées comme un système de construction économique pour les bâtiments à plusieurs étages et les ponts. Leur efficacité est due à l'action combinée entre les poutres d'acier et les dalles de béton. Bien qu'initialement, des dalles de béton solides et des poutres d'acier aient été utilisées pour construire ces structures, de nos jours, les structures mixtes acier-béton sont de plus en plus courantes. Ces structures optimisent les performances des matériaux en acier et en béton grâce à un couplage approprié pour former une section plus efficace. Cependant, le comportement composite de ces structures dépend fortement du glissement interfacial entre les deux matériaux. Pour minimiser le glissement entre l'acier et le béton, des connecteurs mécaniques sont utilisés pour assembler les deux matériaux. Les connecteurs de cisaillement sont donc d'une grande importance, car ils influencent considérablement la résistance et la ductilité des poutres mixtes.

Plusieurs types de connecteurs de cisaillement sont largement utilisés en pratique. Cependant, seuls quelques-uns sont donnés dans l'Eurocodes 4. Par conséquent, des tests sont utilisés pour étudier le comportement des connecteurs du cisaillement. Plusieurs travaux de recherche se sont concentrés sur l'étude de nouveaux types de connecteurs de cisaillement alternatifs à ceux proposés par Eurocodes 4. Ces connecteurs peuvent être utilisés pour transférer les forces de cisaillement longitudinales et limiter le glissement interfacial entre l'acier et le béton. Cependant, dans les travaux précédents, les connecteurs sont vérifiés vis-à-vis des forces de cisaillement et non contre la traction. Eurocodes exige une résistance à l'arrachement d'au moins 10 % de la force de cisaillement. Par conséquent, la recherche présentée dans ce mémoire met en évidence le comportement à l'arrachement de deux types de connecteurs, à savoir le goujon à tête et l'IPE perforé avec une barre d'acier passant par le trou. Une analyse numérique a été étudiée pour vérifier ces connecteurs par rapport aux recommandations de l'Eurocodes 4 et ensuite étudier les paramètres affectant la résistance à l'arrachement des connecteurs. Le contenu de notre mémoire se présente de la manière suivante :

Dans le **premier chapitre**, une analyse bibliographique a été réalisée a pour but de synthétiser les différents travaux de recherche dans le domaine des connexions dans les structures composites acier-béton. Nous avons abordé tout d'abord des généralités sur les connecteurs de cisaillements dans les structures mixte acier-béton. Ensuite, nous avons exposé les diverses études de recherche portant sur le comportement des connecteurs de cisaillement lorsqu'ils sont soumis à des forces d'arrachement.



Dans **le chapitre deux**, un modèle utilisant la méthode des éléments finis (MEF) élaboré pour simuler les essais pull out à l'aide du logiciel de calcul ABAQUS. Après avoir sélectionné une approche de modélisation appropriée et qui correspond aux essais expérimentaux réalisés par Zhaofei Lin et Boursas. F, le modèle à base d'éléments finis développé est validé par rapport aux résultats des tests expérimentaux menés par les deux auteurs, en termes de résistance à l'arrachement des connecteurs de cisaillement en IPE perforé et les goujons à tête.

**Le troisième chapitre**, présente une vérification et interprétation des résultats obtenu à partir de la simulation numérique de l'essai pull out sur les deux types de connecteurs étudiés à savoir IPE perforé et les goujons à tête.

Pour **le quatrième chapitre**, La simulation numérique a également été adoptée dans cette recherche pour évaluer l'effet de différents paramètres sur la résistance à l'arrachement et la ductilité, la rigidité des structures composites acier-béton. L'étude paramétrique réalisée dans ce chapitre nous a permis de tirer l'influence des paramètres étudiés sur le comportement charge-soulèvement des connecteurs de cisaillement en IPE perforé et les goujons à tête, et qui peut donner un aperçu sur le comportement structural de ce type de connecteurs des ouvrages composites acier-béton.

**CHAPITRE 1 : Étude bibliographique sur les  
connecteurs de cisaillement dans les poutres composites  
acier-béton**

## **1. Introduction :**

La construction mixte acier-béton n'est pas récente, son utilisation dans le bâtiment, le plus souvent industriel, et dans les ponts repose sur des qualités complémentaires connues depuis de nombreuses années. Dans tous les cas, il s'agit d'une combinaison entre deux matériaux l'acier et le béton armé. Dans le cas des poutres et des dalles, le profilé est connecté mécaniquement à la dalle de béton. Cette connexion offre une importante résistance au cisaillement à l'interface des deux matériaux, leur permettant de travailler ensemble en flexion. La dalle de béton, outre son rôle de surface porteuse, permet la reprise des efforts de compression ainsi qu'une protection complémentaire intéressante du profilé en acier contre la corrosion et l'incendie, l'acier reprenant principalement les efforts de traction. Dans la plupart des cas (bâtiments multi étagés, ponts), il n'est pas rare de travailler avec des travées de plus 12 mètres. Ces portées génèrent des moments de flexion importants qui peuvent être repris plus avantageusement par une structure mixte, que ce soit en raison de son prix ou de la hauteur du plancher plus faible. Des recherches entreprises à travers le monde, ont démontré que l'association de l'acier et du béton entraîne une réduction de contraintes et de flèches. Le comportement « monobloc » des deux matériaux a exigé l'emploi d'élément de connexion, ces derniers offrent à leur tour des comportements ductiles ou non ductiles. L'efficacité de la liaison, entre les deux matériaux, conditionne surtout la résistance au glissement à l'interface.

### **1.2. Comportement des poutres composites :**

#### **1.2.1. Comportement non composite :**

Dans le cas d'un comportement non composite, la poutre en acier et la dalle en béton fléchissent indépendamment l'une de l'autre. Cela entraîne un déplacement relatif entre les deux composantes, connu sous le nom de "glissement". En raison de ce glissement libre entre la poutre en acier et la dalle en béton, aucune force de cisaillement n'est transmise de la dalle à la poutre. Par conséquent, la rigidité et la résistance de la structure sont réduites par rapport à un comportement composite[1].

Dans ce type de configuration, aucun connecteur de cisaillement n'est utilisé et les sections planes ne restent pas planes. Cependant, il est important de noter que la poutre en acier et la dalle en béton conservent la même courbure le long de toute la poutre. Malgré l'absence de connexion complète entre les deux composantes, cette similitude de courbure permet d'assurer une certaine compatibilité entre elles. Cependant, il est essentiel de prendre en compte les effets du glissement et de considérer les conséquences sur la rigidité globale et la résistance de la structure dans ce type de configuration non composite.

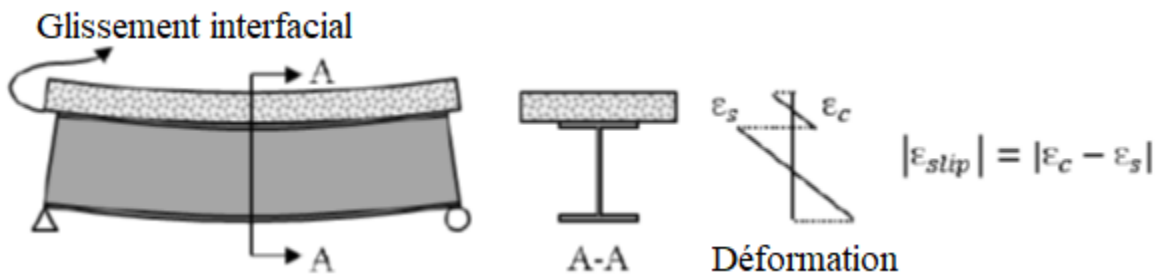


Figure 1. 1 Comportement non composite des poutres mixtes

### 1.2.2. Comportement entièrement composite :

Une poutre est considérée comme "entièrement composite" lorsqu'elle est pourvue d'un nombre suffisant de connecteurs de cisaillement, permettant ainsi de développer la résistance à la flexion totale de sa section transversale. Cela signifie que la résistance de la poutre est principalement déterminée par la résistance combinée de la poutre en acier et de la dalle en béton, plutôt que par la résistance des connecteurs de cisaillement eux-mêmes. En général, pour une analyse élastique, on suppose qu'aucun glissement ne se produit entre l'acier et le béton sous les charges de service.

Le nombre de connecteurs de cisaillement requis pour atteindre une résistance composite totale, noté  $N_f$ , correspond au nombre de connecteurs nécessaires pour transférer la force à l'interface acier-béton à l'état de charge ultime. Dans un comportement entièrement composite, comme illustré dans la Figure 1.2, la poutre en acier et la dalle en béton fléchissent conjointement, agissant comme un seul élément monolithique sous l'effet des charges appliquées. Dans ce type de comportement, les forces de cisaillement sont entièrement transmises de la dalle à la poutre en acier, les sections planes restent planes et le glissement à l'interface acier-béton est négligeable lors des charges de service.[2]

Cependant, même dans le cas de poutres conçues pour atteindre une résistance entièrement composite, il peut y avoir un certain degré de glissement lorsque la résistance ultime de la poutre est atteinte. Ce phénomène est à prendre en compte, mais il est généralement négligeable dans les conditions de charges de service..[1]

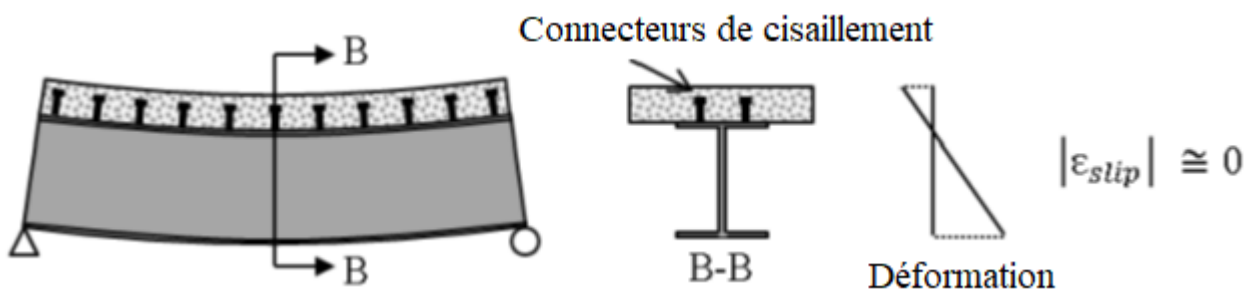


Figure 1. 2 Comportement entièrement composite des poutres mixtes[1]

### 1.2.3. Comportement partiellement composite :

Une poutre est considérée comme "partiellement composite" lorsque la résistance à la flexion de la poutre est principalement influencée par la résistance des connecteurs de cisaillement. Comparée à une poutre entièrement composite, une poutre partiellement composite présente une résistance ultime réduite, car le béton ne peut pas atteindre sa pleine résistance plastique en raison de la limitation de la force dans la dalle par la résistance des connecteurs. La diminution de la résistance à la flexion peut être évaluée en fonction du degré de connexion de cisaillement  $N / N_f$ , où  $N$  représente le nombre réel de connecteurs utilisés.[3]

Le degré minimum de connexion de cisaillement,  $N / N_f$ , est généralement réglementé par les codes de construction, se situant entre 25 et 50% dans le cas des bâtiments. Cette plage est prévue pour permettre un certain degré de ductilité après que la section de la poutre ait atteint sa résistance ultime [1]. Dans un comportement partiellement composite, tel qu'illustré dans la Figure 1.3, il y aura un certain niveau de glissement entre la poutre en acier et la dalle en béton à la fois sous les charges de service et à l'état limite ultime. En conséquence, les sections planes ne restent pas planes. Cependant, il est important de noter que la poutre en acier et la dalle en béton conservent la même courbure, car il n'y a pas de séparation verticale entre elles.

Quelques glissement interfacial

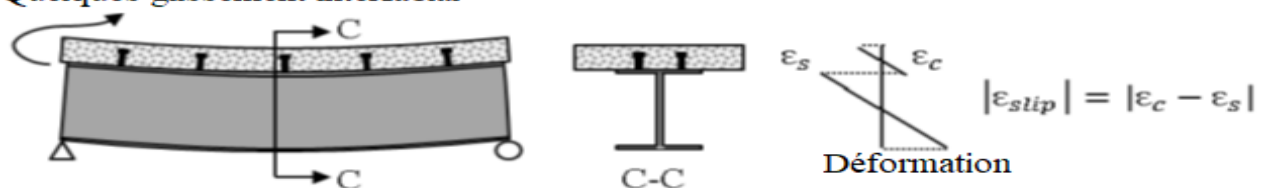


Figure 1. 3 Comportement partiellement composite des poutres mixtes [4].

### 1.3. Classification des connecteurs de cisaillement :

Les connecteurs de cisaillement peuvent être catégorisés en deux types : ductiles et non ductiles. Les connecteurs ductiles sont ceux qui possèdent une capacité de déformation adéquate pour justifier l'hypothèse simplifiée de comportement plastique de la connexion en cisaillement dans la structure étudiée. En d'autres termes, ces connecteurs peuvent subir des déformations significatives tout en maintenant leur intégrité structurelle. Par contre, les connecteurs non ductiles sont ceux qui présentent une capacité de déformation limitée et peuvent se rompre sans se déformer de manière significative.[2]

La Figure 4 illustre des exemples de courbes de cisaillement-glissement obtenues à partir d'essais de poussée, mettant en évidence les comportements ductiles et non ductiles des connecteurs. Ces courbes permettent de visualiser les relations entre la force de cisaillement et le glissement des

connecteurs. Dans le cas des connecteurs ductiles, on observe une augmentation progressive de la force avec le glissement, indiquant une capacité de déformation importante. En revanche, pour les connecteurs non ductiles, la force atteint rapidement un pic avant de diminuer brusquement, témoignant de leur faible capacité de déformation. Il est important de choisir des connecteurs adaptés en fonction des exigences spécifiques de la structure et des contraintes auxquelles ils seront soumis. Les connecteurs ductiles sont souvent préférés dans les applications où une déformation plastique significative est nécessaire pour absorber l'énergie et améliorer la résilience de la structure face aux charges dynamiques ou sismiques.

### **1.3.1. Connecteurs en cisaillement ductiles :**

Les connecteurs ductiles sont caractérisés par leur capacité à permettre un glissement adéquat à l'interface entre l'acier et le béton, tout en maintenant leur résistance au cisaillement. Selon les recommandations de l'Eurocodes 4 [3], un connecteur peut être considéré comme ductile s'il présente une capacité de glissement caractéristique égale ou supérieure à 6 mm, à condition que le degré de connexion en cisaillement soit suffisant pour les portées de la poutre concernée.

L'Eurocodes 4 [3] précise également que les goujons à tête sont généralement considérés comme ductiles, avec certaines limitations à prendre en compte. Tout d'abord, le diamètre des goujons doit se situer dans une plage comprise entre 16 mm et 22 mm. De plus, la longueur totale du goujon ne doit pas être inférieure à quatre fois son diamètre. Ces critères de dimensionnement visent à garantir que les connecteurs ductiles sont suffisamment robustes pour résister aux sollicitations en termes de glissement et de cisaillement, tout en permettant une déformation adéquate. Ils constituent des paramètres importants lors de la conception des connexions acier-béton pour assurer la performance et la sécurité de la structure. Il est essentiel de respecter ces limitations et de sélectionner des connecteurs appropriés en fonction des exigences spécifiques de la construction.[4]

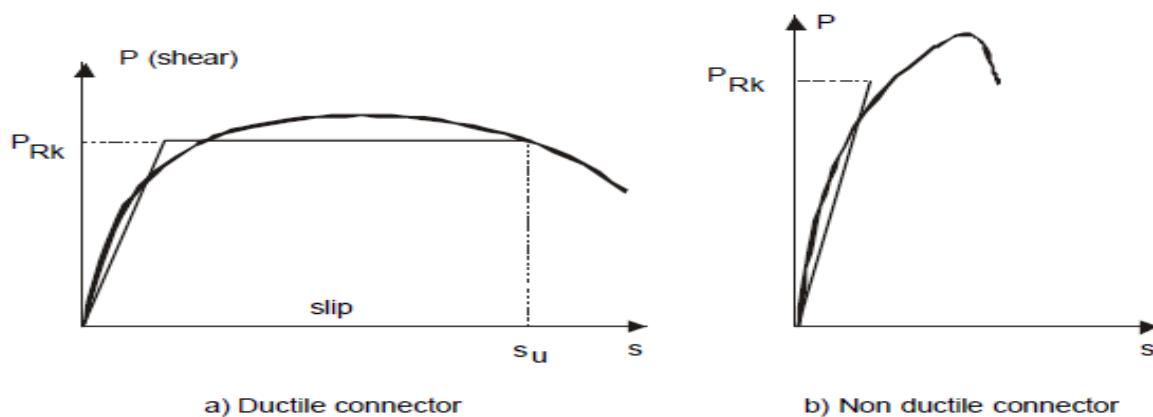
### **1.3.2. Connecteurs en cisaillement non ductiles :**

Les connecteurs non ductiles ou rigides ne permettent pas la redistribution des contraintes tangentielles le long de la structure ; le cisaillement longitudinal est donc calculé en utilisant la répartition des contraintes dans les sections transversales critiques selon la méthode élastique. Les connecteurs non ductiles, également connus sous le nom de connecteurs rigides, comprennent des types tels que les connecteurs en butée en forme de barreau ou en forme de T [4].

L'utilisation de connecteurs rigides restreint la capacité de la structure à redistribuer les forces le long de l'interface acier-béton. Par conséquent, lors de l'analyse du cisaillement longitudinal, on se base sur la répartition des contraintes initiales dans les sections transversales critiques de la

structure, en utilisant des méthodes basées sur l'élasticité. Les connecteurs rigides, tels que les connecteurs en butée en forme de barreau ou en forme de T sont des exemples de connecteurs non ductiles souvent utilisés. [4],

Ces connecteurs rigides sont conçus pour maintenir une connexion solide entre l'acier et le béton, mais ils ne sont pas capables de supporter des déformations plastiques significatives. Ils sont généralement utilisés dans des applications où des connexions stables et robustes sont nécessaires, mais sans nécessiter de capacité de déformation importante. Lors de la conception de structures utilisant de tels connecteurs, il est essentiel de prendre en compte leurs limitations et de s'assurer qu'ils répondent aux exigences spécifiques de la construction en termes de rigidité et de résistance aux efforts de cisaillement. [5]



**Figure 1. 4 Classification des connecteurs de cisaillement**

#### 1.4. Modes de rupture des poutres mixtes avec connecteurs de cisaillement :

Les poutres mixtes acier-béton peuvent subir la rupture sous l'effet de trois types de chargements différents :

- Le premier mode de chargement correspond à une charge croissante appliquée instantanément sur la structure.
- Le deuxième mode de chargement implique une charge constante dans le temps, inférieure à la charge de ruine quasi-statique. Ce mode met en jeu les effets du fluage et du retrait du béton de la dalle.
- Le dernier mode de chargement est cyclique, avec une charge également inférieure à celle de la ruine quasi-statique[6].

Lors de sollicitations statiques, il est possible d'identifier trois modes de rupture potentiels :

- **Mode 1** : Rupture du béton, soit par dislocation locale soit par fendage de la dalle, ou une combinaison des deux.
- **Mode 2** : Rupture de l'acier due au cisaillement des connecteurs ou des soudures.
- **Mode 3** : Rupture mixte résultant d'une déformation excessive de l'acier, entraînant une concentration accrue des contraintes dans le béton, puis la rupture de ce dernier[1].

La nature de la rupture dépend du type de connecteurs utilisés. Les connecteurs très rigides conduisent principalement à une rupture selon le mode 1, tandis que les connecteurs ductiles entraînent des ruptures selon les modes 2 et 3. En revanche, les connecteurs semi-ductiles peuvent provoquer une rupture par dislocation locale du béton, Ces différents modes de rupture doivent être pris en compte lors de la conception et de l'évaluation des performances des poutres mixtes acier-béton. La sélection appropriée des connecteurs en fonction des exigences de la structure permet de garantir une résistance et une durabilité optimales[7]

### **1.5. Essai sur les connecteurs de cisaillement :**

#### **1.5.1. Essai de cisaillement « Push-Out » :**

Il est possible d'évaluer le comportement structural des connecteurs de cisaillement à l'aide de tests appelés tests de « Push-Out ». Ces tests permettent d'obtenir des informations précieuses telles que la courbe force-glissement, la force maximale atteinte et le mode d'effondrement de la liaison. Les procédures actuelles pour les tests de type « Push-Out » comprennent la spécification des dimensions des modèles à tester et la détermination de la capacité nominale des connecteurs. La Figure 1.5 présente les détails du modèle adopté par l'Eurocodes 4 [6] pour ces tests.

Le modèle utilisé dans ces tests se compose d'un profilé en acier de type "H" connecté à deux plaques de béton par des connecteurs de cisaillement. Les plaques de béton doivent être pourvues d'armatures, dont la position et le diamètre des barres sont également spécifiés. Cette méthode d'essai est utilisée à la fois dans l'Eurocodes 4 [6] et dans la norme britannique BS 5400.

L'essai lui-même consiste essentiellement à appliquer une force verticale sur le profilé en acier afin de mesurer le glissement relatif entre la plaque de béton et le profilé à chaque augmentation de charge. Cette démarche permet ainsi de construire la courbe force-glissement, qui est une représentation graphique du comportement de la liaison. Grâce à ces tests de « Push-Out », il est possible d'évaluer les performances des connecteurs de cisaillement et de déterminer leur résistance et leur capacité à transférer les charges entre l'acier et le béton. Ces informations sont essentielles pour garantir la sécurité et la fiabilité des structures mixtes acier-béton.[8]



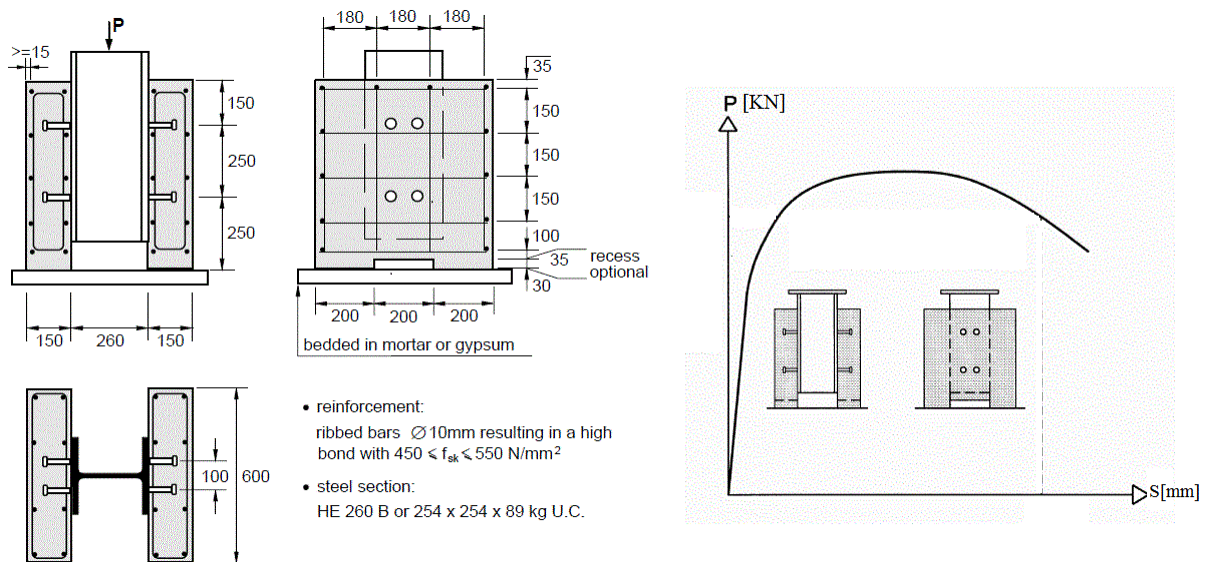


Figure 1. 5 Spécimen de l'essai de push-out selon EUROCODE 4[9]

### 1.5.2. Essai de cisaillement « pull out » :

L'essai d'arrachement direct, également appelé Pull out, est décrit dans les recommandations de la RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages) [8]. C'est l'un des essais les plus simples à mettre en œuvre pour évaluer le comportement des interfaces entre l'armature et le béton. La Figure 1.6 illustre le principe de cet essai ainsi qu'un exemple de montage.

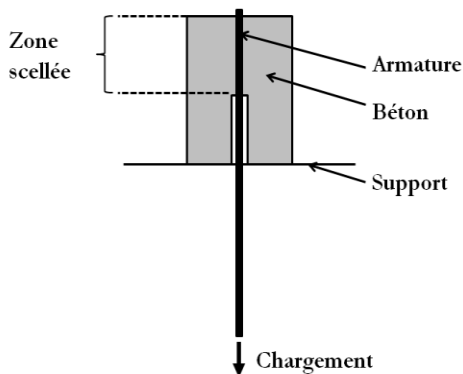


Figure 1. 6 Principe de l'essai Pull out et exemple de montage

Lors de cet essai, une armature est encastrée dans une éprouvette de béton, qui peut être de forme cubique ou cylindrique. Un élément de séparation, généralement un tube, est placé du côté de la charge. Cela permet de régler la longueur de scellement de l'armature et de limiter les effets de bords qui pourraient induire un confinement supplémentaire dans la zone de butée du béton. La

longueur de scellement est généralement choisie pour être quelques diamètres de l'armature, afin d'assurer une rupture par décohéation et glissement de la barre en PRF (Polymère Renforcé de Fibres). Un scellement plus long pourrait entraîner une rupture en traction de l'armature ou une fissuration du béton.[10] Pendant l'essai, la force appliquée et le glissement de l'armature sont enregistrés en continu. Cela permet d'établir la relation entre la contrainte moyenne d'adhérence et le glissement, qui caractérise le comportement de l'armature scellée à l'interface. Bien que cet essai ne soit pas le plus représentatif du comportement de l'interface dans une section tendue d'un élément de structure, il reste utile pour des études comparatives, notamment pour évaluer les différences de comportement et les résistances à l'arrachement entre différentes configurations..[10]L'essai d'arrachement direct ou Pull out fournit ainsi des informations essentielles sur la performance de l'interface entre l'armature et le béton. Il permet de mieux comprendre le fonctionnement de cette interface dans des conditions spécifiques et constitue un outil précieux pour la recherche comparative et l'optimisation des solutions constructives. [11]

### **1.5.3. Essai de cisaillement sur poutres :**

Les essais sur poutre sont moins fréquemment utilisés que les essais de type push-out et les essais de cisaillement direct en raison de leur durée plus longue, de leur coût plus élevé et de leur difficulté de réalisation. Cependant, malgré ces contraintes, les essais sur poutre à grande échelle offrent des résultats plus précis que les essais réalisés à petite échelle. [1]

Dans le cadre de ces essais sur poutre, une série d'expériences a été menée, comprenant des essais de poussée ainsi que six essais sur des poutres mixtes acier-béton à connexion partielle, où les connecteurs utilisés étaient de type C. Ces essais ont permis d'obtenir des données plus détaillées sur le comportement des poutres partiellement composites.

En outre, les chercheurs ont développé des équations différentielles spécifiques pour l'analyse des poutres partiellement composites, en prenant en compte la répartition uniforme des forces de cisaillement. Ces équations permettent d'approfondir la compréhension du comportement des poutres partiellement composites et de mieux évaluer leurs performances structurales.

Malgré les défis liés à la réalisation des essais sur poutre, ces derniers restent essentiels pour obtenir des résultats plus précis et fiables. Leur contribution à l'avancement des connaissances dans le domaine des structures mixtes acier-béton est inestimable, car ils permettent de mieux appréhender le comportement réel de ces éléments dans des conditions d'utilisation réelles. [12]

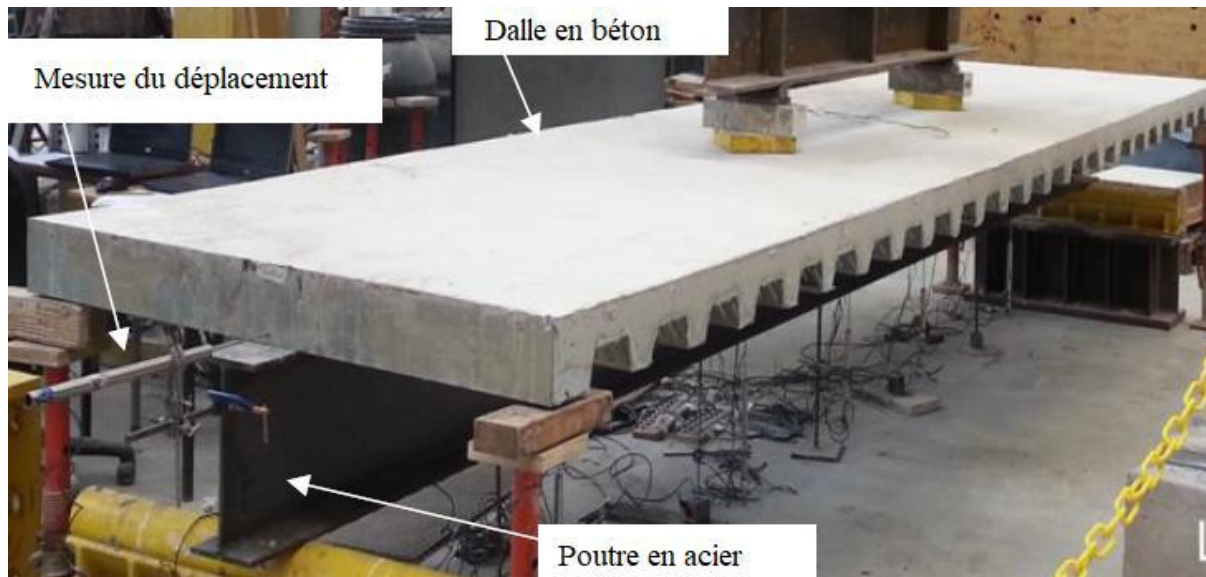


Figure 1. 7 Essai de cisaillement sur poutre [13]

#### 1.5.4. Essai de cisaillement direct :

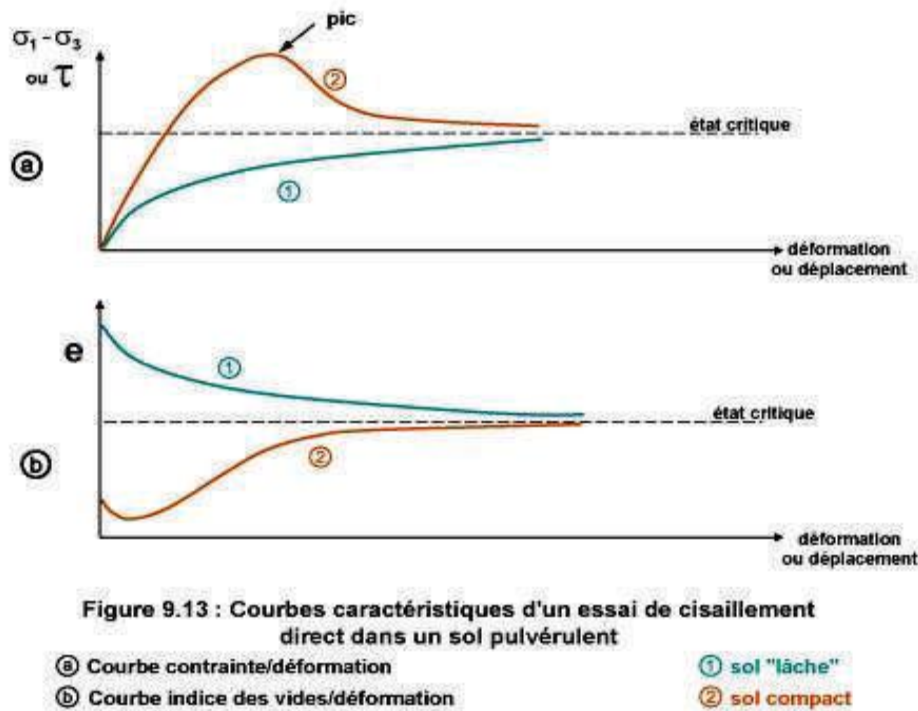
L'objectif de cet essai est de mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon soumis à un cisaillement direct selon un plan spécifique, à une vitesse constante. Cela permet de déterminer les valeurs de l'angle de frottement effectif ( $\phi'$ ) et de la cohésion effective ( $c'$ ) dans des conditions de vitesse lente et de drainage, qui sont des paramètres utilisés pour le dimensionnement, les calculs de vérification des coefficients de sécurité des talus et la détermination des actions de poussée. [5] L'essai se déroule sur une éprouvette placée dans un dispositif de cisaillement composé de deux demi caissons indépendants. Le plan de séparation des deux demi caissons constitue un plan de glissement préférentiel correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette.

La procédure de l'essai est la suivante :

- Dans une première phase de consolidation, l'éprouvette de section  $s$  est consolidée en appliquant une charge verticale constante sur sa face supérieure, maintenue pendant toute la durée de l'essai (contrainte  $\sigma_n = N/s$ ). Cette phase de consolidation permet de calculer la vitesse à laquelle l'échantillon doit être soumis au cisaillement.
- Ensuite, l'échantillon est cisailé le long du plan de séparation des deux demi caissons en imposant un déplacement relatif à vitesse constante. L'effort de cisaillement horizontal ( $T$ ) est mesuré et la contrainte  $\tau = T/s$  est calculée.

Cet essai permet donc de déterminer les propriétés de rupture de l'échantillon, en mesurant l'effort de cisaillement et en calculant la contrainte correspondante. Ces données sont essentielles pour

l'évaluation du comportement du matériau dans des situations de cisaillement et pour la conception des structures soumises à des charges de poussée..[14]



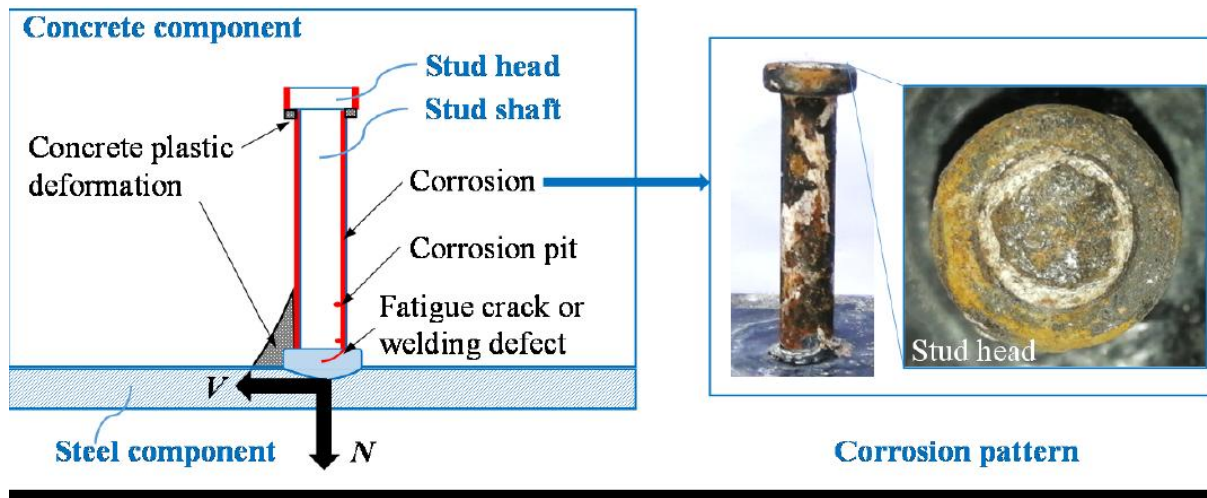
**Figure 1. 8 Courbes expérimentales d'un essai de cisaillement direct**

**1.6. Travaux de recherches sur la résistance à l'arrachement des connecteurs de cisaillement :**

**1.6.1. Étude numérique sur la performance en traction du goujon à tête avec section endommagée :**

Une étude numérique approfondie a été menée pour évaluer les performances en traction des connecteurs à goujon à tête, en prenant en compte les dommages causés par la corrosion qui peuvent compromettre leur intégrité. Le chercheur Xiaoqing Xu [12] a utilisé la méthode des éléments finis pour développer des modèles tridimensionnels pour les essais d'arrachement, en tenant compte à la fois des propriétés des matériaux et des non-linéarités géométriques. Plus précisément, la zone affaiblie du béton due au saignement a été simulée dans les modèles. La méthode de simulation a été validée en comparant les résultats des essais d'arrachement effectués sur deux connecteurs présentant différents degrés de dommages. L'étude a examiné les performances en traction des connecteurs à goujon à tête de différents diamètres, permettant ainsi d'évaluer leur capacité à résister aux charges de traction. Cette analyse numérique approfondie fournit des informations précieuses sur le comportement des connecteurs à goujon à tête et aide à

mieux comprendre leur résistance en présence de dommages de section de tête, notamment ceux causés par la corrosion.



**Figure 1. 9 Dommages aux connecteurs de cisaillement des goujons à tête**

Dans cette étude, des essais de traction ont été réalisés sur des connecteurs de cisaillement sous forme de goujons à tête de différents diamètres. La variable étudiée était le degré de dommage de la section de la tête du goujon. Les goujons à tête corrodés, après avoir été soumis à des tests de corrosion accélérée effectués par les auteurs [12], ont été utilisés pour ancrer l'échantillon à une poutre en acier en forme de I afin d'améliorer la tension.

Dans l'étude numérique de Xiaoqing Xu [10], les essais d'arrachement ont été utilisés pour évaluer l'effet du dommage de la section de la tête du goujon. Il était important de prendre en compte la région de béton affaibli due au saignement dans le modèle d'élément fini, et il a été constaté que son module d'élasticité influençait significativement la rigidité du connecteur. Lorsque le degré de dommage de la section de la tête atteignait 38 %, le mode de rupture passait de la rupture du cône de béton à la rupture [12]. Une équation a été proposée pour calculer le facteur de réduction en tenant compte de la surface d'appui et du degré de dommage. Il a été observé que la rigidité en traction diminuait lorsque la taille de la tête du goujon diminuait.

### **1.6.2. Etude paramétrique de connecteurs de cisaillement en forme de I avec différentes orientations :**

Le travail mené par F. Boursas et al [13] vise à améliorer la compréhension du comportement des nouveaux types de connecteurs de cisaillement. L'étude se concentre spécifiquement sur les connecteurs en forme de I, soumis à une charge monotone, dans quatre orientations différentes. L'objectif est de déterminer la position qui offre la plus grande résistance au cisaillement et la meilleure ductilité. Les résultats des tests de charge ainsi que les modes de rupture observés pour

les connecteurs testés sont présentés et discutés. De plus, une modélisation par éléments finis 3D non linéaire du test de push-out est réalisée afin d'étudier plus en détail les paramètres influençant le comportement des connecteurs en forme de I.

L'idée principale de cette recherche est de tester des connecteurs en forme de I en acier dans différentes orientations par rapport à l'axe principal de la poutre en acier, qui est l'axe d'action principal dans une poutre mixte acier-béton. Cette section du travail met en évidence le programme expérimental mis en place, décrit les spécimens utilisés pour les tests de push-out et explique leur configuration. [1]



**Figure 1. 10 échantillons push-out testés.**

Voici les principales conclusions de l'étude :

- L'orientation du connecteur en forme de I a une influence significative sur sa capacité de charge en cisaillement.
- Les connecteurs en forme de I présentent une ductilité suffisante dans toutes les orientations testées.
- La rupture des connecteurs est principalement due à l'écrasement du béton.
- La nuance d'acier du connecteur en forme de I n'a pas d'influence significative sur sa capacité de charge et sa ductilité.

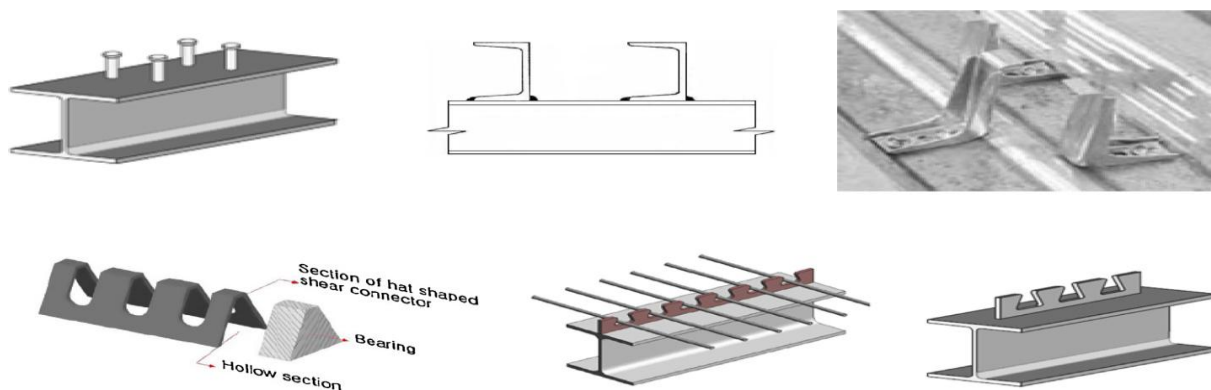
### **1.6.3. Connecteurs de cisaillement perforés sur poutres mixtes sous chargement monotone :**

Les résultats de seize essais de poussée ont été obtenus grâce à des travaux menés par le chercheur L.F. Costa-Neves au Département de Génie Civil de l'Université de Coimbra, au Portugal.[15] Ces essais portaient sur des connecteurs de cisaillement en acier perforé présentant différentes géométries. La recherche comprenait huit essais initiaux sur les géométries Perforé et T-Perforé, qui avaient déjà été étudiées, suivis de huit autres essais sur deux géométries innovantes : l'I-

Perforé et le 2TPerforé. Les variables étudiées incluaient la géométrie du connecteur de cisaillement et la présence de renfort dans les trous du connecteur. [15]

Les résultats obtenus ont été soigneusement analysés et discutés, en mettant l'accent sur les réponses structurelles des connecteurs de cisaillement. Les principaux aspects étudiés étaient la capacité de transfert de cisaillement, la ductilité, la répartition des contraintes et les modes de rupture. Les résultats expérimentaux sont présentés de manière détaillée et ont fait l'objet d'une discussion approfondie. En outre, une comparaison entre les résultats expérimentaux et des modèles analytiques existants pour les connecteurs de cisaillement Perforé et T a été réalisée. Cette comparaison avait pour objectif d'évaluer la précision et l'applicabilité de ces modèles. Les conclusions de cette étude comparative sont également présentées et discutées.

En résumé, cette recherche offre une analyse approfondie des performances des connecteurs de cisaillement en acier perforé, en examinant différentes géométries et configurations. Les résultats expérimentaux sont accompagnés d'une discussion critique et d'une comparaison avec des modèles analytiques existants, ce qui contribue à une meilleure compréhension de ces connecteurs et de leur utilisation dans des applications structurelles. [15]



**Figure 1. 11 Exemples de connecteurs de cisaillement.**

#### **1.6.4. Forces d'arrachement dans les poutres mixtes avec de grandes ouvertures (2013) :**

Les poutres composites comportant de larges ouvertures d'âme sont couramment utilisées dans la conception des structures. Leur résistance est principalement contrôlée par la flexion aux quatre coins de chaque ouverture, où une action composite locale avec la dalle de plancher est présente. Cependant, le développement de cette résistance à la flexion peut être limité par la rupture par arrachement des connecteurs de cisaillement. C'est dans ce contexte que le chercheur R.M. Lawson a utilisé un modèle d'éléments finis élasto-plastiques non linéaires pour étudier ce mode de rupture par arrachement dans une poutre composite avec des ouvertures d'âme. [11] Dans cet

article, un essai a été réalisé sur une dalle composite représentative, dans lequel les connecteurs de cisaillement étaient soumis à une traction pure. La charge de rupture obtenue lors de cet essai était de 67 kN, soit environ 70 % de la charge longitudinale de résistance au cisaillement. Ce résultat met en évidence l'importance de comprendre les forces d'arrachement dans les connecteurs de cisaillement et leur influence sur la résistance à la flexion des poutres composites. Dans la première partie de l'étude, l'auteur a utilisé la méthode des éléments finis pour évaluer les forces dans les connecteurs de cisaillement au-dessus des ouvertures longues. L'analyse initiale était basée sur une approche élastique, mais la problématique spécifique concernait les forces d'arrachement dans les connecteurs de cisaillement et leur impact sur la résistance à la flexion.[11], La deuxième partie de l'étude s'est concentrée sur les essais d'arrachement réalisés sur des connecteurs de cisaillement dans une dalle mixte. Dans les normes Eurocodes 4 [9], aucune recommandation spécifique n'est donnée concernant la conception de la résistance des connecteurs de cisaillement soumis à la traction. Toutefois, il est généralement recommandé que la force de traction dans les connecteurs de cisaillement ne dépasse pas 10 % de leur résistance au cisaillement lors de la conception des poutres mixtes. Des travaux antérieurs menés par Palleres et Hajjar [16] ont montré que la résistance à la traction d'un connecteur de cisaillement dans une dalle pleine est similaire à sa résistance au cisaillement. Ainsi, cette étude approfondie vise à mieux comprendre le comportement des connecteurs de cisaillement dans les poutres composites avec des ouvertures d'âme. Les résultats expérimentaux obtenus sont accompagnés d'une analyse numérique détaillée, soulignant l'importance des forces d'arrachement dans la résistance à la flexion et offrant des informations précieuses pour la conception et la vérification de ces structures.[11]

#### **1.6.5. Comportement des goujons sous charges combinées de cisaillement et de traction :**

Le principal objectif de cette étude est d'examiner le comportement des goujons à tête soumis à des charges combinées de traction et de cisaillement. Des éprouvettes ont été préparées et testées dans différentes conditions afin de mieux comprendre la force d'interaction entre le cisaillement et la tension. Une amélioration de cette force d'interaction est proposée, accompagnée d'une équation correspondante. De plus, des expressions ont été développées pour calculer le facteur de réduction de la rigidité de cisaillement et prédire la relation charge-glissement sous des charges combinées.





**Figure 1. 12** Mise en place de tests d'arrachement. [17]

Dans le cadre du test d'arrachement (pull out test) effectué dans cette étude, la figure 1.12 présente la configuration utilisée. Pour assurer une condition de charge uni axiale en traction, deux vérins sont placés symétriquement. Quatre capteurs de déplacement d'une précision de 0,005 mm sont également installés de manière symétrique pour mesurer la séparation relative entre la poutre en acier et le bloc de béton. De plus, du sable fin est répandue sous le bloc de béton pour assurer une répartition uniforme de la charge. Tous les spécimens sont chargés jusqu'à la rupture pour obtenir des résultats significatifs.

Concernant la résistance au cisaillement, l'Eurocodes 4[9] indique que si le rapport entre la hauteur nominale totale et le diamètre de la tige du goujon est supérieur à 4, l'augmentation de la taille du goujon n'affecte pas la résistance au cisaillement.

Les résultats obtenus dans cette étude ont révélé les observations suivantes :

- Pour les goujons à tête soumis à une charge de traction, deux modes de rupture ont été observés : la rupture par arrachement du béton et la rupture dans la tige du goujon.
- Pour les goujons soumis à une charge de cisaillement, la rigidité diminue.
- Les résultats indiquent que la réduction de la rigidité de cisaillement n'est pas uniquement due à la diminution de la résistance au cisaillement, mais aussi à l'augmentation du glissement.
- Il a été constaté une réduction de la résistance au cisaillement du goujon lorsqu'il est soumis à une charge combinée en présence d'une force de tension.

Ces résultats fournissent des informations essentielles pour mieux comprendre le comportement des goujons à tête sous des charges combinées de traction et de cisaillement, et ils contribuent à l'amélioration de la conception et de l'analyse de ces éléments dans les structures.

### 1.6.6. Étude paramétrique sur la capacité de cisaillement des trous circulaires et des trous longs de connecteur du cisaillement perforé :

Dans les structures composites en acier et en béton, les connecteurs de cisaillement, tels que les connecteurs perforés, sont couramment utilisés. Cependant, il est défavorable d'améliorer la connexion des connecteurs perforés, ce qui a conduit à des problèmes. Pour résoudre cette problématique, dans l'article de Shuangjie Zheng,[18] une approche consiste à réaliser des trous longs sur les plaques nervurées en acier. Leur étude comprend des tests push-out visant à comparer les modes de rupture, la capacité de cisaillement et le comportement de glissement des connecteurs perforés.

Les principales conclusions de cette étude sont :

- Les modes de rupture des connecteurs perforés, qu'ils aient des trous circulaires ou des trous longs, sont caractérisés par une rupture du béton.
- Pour les connecteurs perforés avec des trous circulaires de même surface de trou, la variation de la résistance au cisaillement est négligeable entre les trous circulaires et les trous longs.
- La rigidité des connecteurs perforés augmente avec le diamètre et la hauteur des trous.
- Les courbes charge-glissement de tous les spécimens de connecteurs perforés présentent une rigidité lors de la phase initiale de chargement, avec très peu de glissement relatif.

Ces résultats sont importants pour comprendre le comportement des connecteurs perforés et pour améliorer leur performance dans les structures composites en acier et en béton. Ils permettent d'optimiser la conception et l'utilisation de ces connecteurs, en assurant une meilleure résistance au cisaillement et une plus grande fiabilité dans les applications réelles.

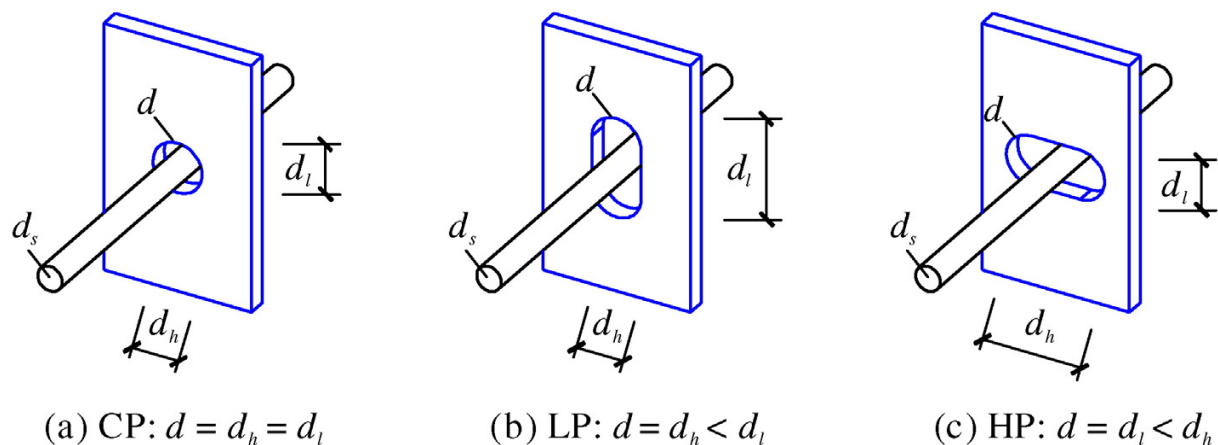


Figure 1. 13 Trou circulaire et trou long de la nervure perforé .[18]

### 1.6.7. Capacité de résistance à l'arrachement d'un nouveau cisaillement Perforé pour renforcement de chapeau de pieu en acier (2016) :

Cet article, rédigé par Young-Ho Kim, présente un nouveau type de connecteurs perforés de cisaillement qui vise à renforcer le chapeau de pieux en acier intégré dans les fondations des structures. L'auteur a réalisé des essais visant à améliorer la capacité de résistance à l'arrachement de ces connecteurs dans des conditions limitées. Les tests ont étudié le comportement général et le mode de rupture des connecteurs. Des fissures ont été observées sous le bloc de béton, et des tableaux ainsi que des schémas de courbes charge-glissement ont été utilisés pour analyser les variations de ce phénomène de fissuration, qui diffère d'un spécimen à l'autre. La rupture du béton a été observée dans tous les modes de rupture étudiés.[19]



**Figure 1. 14 Renforcement des têtes de pieux en acier à l'aide des connecteurs de cisaillement perforé .[19]**

Les résultats de l'étude sont résumés de la manière suivante :

- Les connecteurs perforés de cisaillement proposés dans cette étude permettent de supporter la charge de traction maximale.
- La taille des trous dans les connecteurs perforés doit être suffisamment grande pour assurer l'intégration des barres d'armatures transversales dans le béton, ce qui améliore la capacité de résistance au cisaillement.

En général, la présence d'armatures transversales améliore la charge de traction maximale et contribue à maintenir un niveau significatif de ductilité après avoir atteint la charge maximale. Ces résultats suggèrent que l'utilisation de ces connecteurs perforés de cisaillement peut renforcer efficacement les chapeaux de pieux en acier et améliorer leur résistance à l'arrachement, tout en conservant des caractéristiques de ductilité importantes. Ces informations sont précieuses pour la

conception et l'optimisation des fondations de structures, en assurant une performance structurelle optimale et une meilleure fiabilité dans des conditions d'utilisation réelles.

### 1.6.8. Étude expérimentale sur le comportement des connecteurs de cisaillement perforé avec trous long cranté :

L'article rédigé par Xizhi Wang [18] limite l'application des connecteurs de cisaillement perforés aux ponts mixtes acier-béton ayant des hauteurs importantes. En effet, il est difficile d'améliorer la connexion des connecteurs de cisaillement en augmentant le diamètre des trous, et il est également compliqué d'installer des barres d'armatures transversales dans ces trous perforés. La configuration du test de résistance à l'arrachement est présentée à travers la figure 1.15. Une charge de cisaillement est appliquée à l'aide d'un système hydraulique, et une couche de sable fin est utilisée sous le fond de béton pour réduire les forces de réaction concentrées. Les chargements sont progressivement réduits sur une durée supérieure à 30 minutes.

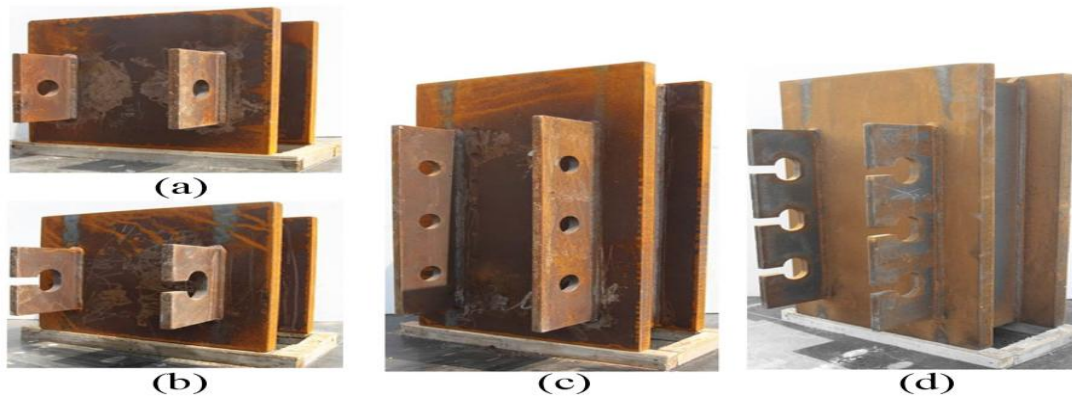


Figure 1. 15 Configurations des connecteurs perforés

Les conclusions de l'étude sont les suivantes :

- Les connecteurs perforés à trou circulaire présentent une augmentation de la résistance au cisaillement par rapport aux connecteurs perforés à trou circulaire.
- Un chargement répété entraîne une légère réduction de la résistance au cisaillement des connecteurs perforés à trou circulaire, mais cela a peu d'impact sur ceux avec un long trou cranté.
- Les connecteurs à plusieurs rangées présentent une réduction des capacités de cisaillement et une augmentation des pics de glissement par rapport aux connecteurs à une rangée.

Ces résultats mettent en évidence les avantages et les limitations des connecteurs de cisaillement perforés dans les structures mixtes acier-béton avec des hauteurs importantes. Ils permettent de

mieux comprendre les performances de ces connecteurs et de les intégrer de manière appropriée dans la conception des ponts mixtes, assurant ainsi une meilleure résistance au cisaillement et une plus grande fiabilité structurelle.

#### **1.6.9. Etude Expérimentale et Paramétrique sur la résistance d'un connecteur de cisaillement Perforé entaillé :**

Les structures composites en acier et en béton ont été de plus en plus utilisées dans la construction de ponts. En raison de leurs excellentes performances structurelles et de leur coût de construction favorable. Le cisaillement entre l'acier et le béton est essentielle pour la conception de structures composites. Parmi les différents types de connecteurs de cisaillement le type perforé est l'un des connecteurs de cisaillement les plus compétitifs dans la pratique, ayant une grande résistance au cisaillement, une rigidité au cisaillement, et la résistance à la fatigue, Le connecteur de cisaillement perforé conventionnel est une plaque d'acier plate qui fait des trous circulaires. Des goujons en béton se formeront dans ces trous circulaires pour résister aux forces de cisaillement et éviter la séparation entre l'acier et le béton. Avec les mérites d'une installation plus facile, pas évident problèmes de fatigue, une plus grande rigidité et une plus grande résistance au cisaillement, les connecteurs de cisaillement perforé ont de plus en plus utilisés dans de nombreux types de structures composites innovantes [20]

Les paramètres étudiés sont :

- Influence du diamètre du trou.
- Influence de la largeur de coupe.
- Influence de l'épaisseur du connecteur perforé.
- Influence de la résistance du béton.
- Influence du diamètre de l'armature.
- Influence de la résistance des barres d'armature.
- Influence de la résistance de l'acier.

L'auteur Shuangjie Zheng[20]étude la résistance de cisaillement sur les connecteurs de perforé il basé sur le test pull out et l'analyse numérique de l'étude paramétrique sur les connecteurs crantées on conclut que :

- Les modes de rupture par traction des connecteurs perforés à encoches et à un cisaillement et caractérisés par des fissures dans la dalle de béton.

- La méthode des éléments finis proposée est validée par comparaison avec les résultats des essais de retrait. Les résultats numériques ressemblent assez bien aux échecs de traction des connecteurs de cisaillement de perforé.[20]

#### **1.6.10. Évaluation expérimentale de nouvelles formes de connecteurs de cisaillement en U :**

Les auteurs B. Maghghi, et al[21] se sont penchés sur les connecteurs de cisaillement en U» dans les poutres mixtes acier-béton. Ces connecteurs sont une solution pratique pour assurer la connexion en raison de leur disponibilité et de la simplicité de leur soudure. Cependant, lorsque la longueur du connecteur de cisaillement de canal est augmentée, cela a un impact négatif sur les dalles de béton et crée des difficultés pour traverser les armatures longitudinales. Pour remédier à ce problème, cinq nouvelles formes de connecteurs de cisaillement de canal sont proposées et étudiées dans cet article.

Douze tests d'arrachement utilisant une nouvelle configuration et trois essais d'arrachement ont été réalisés sous chargement monotone afin d'identifier la forme de connecteur offrant les meilleures performances. Les modes de rupture, ainsi que les effets des nouvelles formes de canaux sur le comportement de glissement de charge, les fissurations du béton, la déformation en flexion et la distance entre les deux charnières plastiques près de la base des connecteurs de canal, ont été principalement étudié. Les essais d'arrachement pull out ont étudié le comportement des connecteurs de canal dans des poutres composites acier-béton avec des dalles préfabriquées. Cette étude a conclu que l'utilisation d'un mortier de faible résistance comme matériau de remplissage entraînait une séparation prématurée de la dalle en béton de la section en acier. Par conséquent, les recherches futures devraient se concentrer sur la détermination de la résistance au soulèvement de ces connecteurs. Ainsi, dans cette étude, l'effet de la réduction de la tête du connecteur de cisaillement de canal a été étudié afin d'éviter la séparation de la dalle de béton[21].

Les conclusions sont les suivantes :

- La nouvelle configuration de test push-out adoptée dans cette étude, grâce à la création d'un système mobile, a permis de concentrer la charge sur la semelle où se trouve le plan de cisaillement.
- Comparés aux connecteurs de cisaillement de canal ordinaires dans les tests push-out, les nouvelles formes de canaux ont donné des résultats significatifs en termes de ductilité.
- Les essais d'arrachement et les séparations acier-béton transversales observées dans les tests push-out montrent que la réduction de la tête du connecteur de cisaillement de

canal dans les nouvelles formes n'affecte pas la fonction du connecteur pour empêcher la séparation de la dalle de béton.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de concevoir des connecteurs de cisaillement en U adaptés dans les poutres mixtes acier-béton, en tenant compte de la performance en termes de résistance, de glissement et de comportement global de la structure.

#### **1.6.11. Étude expérimentale sur des connecteurs démontables soumis au Cisaillement-traction combinés :**

Les travaux de recherche menés par EeLoon Tan [22] se concentrent sur l'utilisation croissante des poutres composites dans la construction en raison de leurs nombreux avantages par rapport aux poutres entièrement en acier. Dans certains cas, tels que les poutres de couplage composites et les murs de remplissage, les connecteurs acier-béton doivent non seulement résister aux forces de cisaillement, mais aussi aux forces de soulèvement. Par conséquent, des essais expérimentaux sont nécessaires pour étudier les performances des connecteurs acier-béton soumis à des charges combinées. De plus, la séparation entre les composants en acier et en béton est une activité destructrice qui nécessite la refusions du composant en acier s'il doit être réutilisé. Cependant, cette refonte nécessite de l'énergie, qui est généralement issue de sources non durables, ce qui soulève des préoccupations environnementales.

Dans le cadre de l'étude, un essai d'arrachement, appelé pull out test, a été réalisé pour évaluer la résistance à la traction des trois types de connecteurs acier-béton étudiés. Le spécimen d'essai était composé de deux poutres placées perpendiculairement et reliées par quatre boulons. Les connecteurs acier-béton, espacés de 100 mm au centre, étaient intégrés dans le bloc de béton à travers des trous pré-perçés dans la poutre inférieure. La poutre supérieure avait pour objectif principal d'augmenter la hauteur verticale, car la longueur de course du vérin était limitée.

Les résultats obtenus sont les suivants :

- Les goujons à tête démontable ont montré une ductilité, comme en témoigne le glissement significatif observé dans leur comportement charge-glissement lors du cisaillement.
- Une réduction importante de la résistance au cisaillement a été observée lors de la traction.
- Le mode de rupture principal des goujons à tête démontable était la rupture du goujon.

Ces résultats soulignent l'importance de comprendre le comportement des connecteurs acier-béton soumis à des charges combinées et mettent en évidence la nécessité d'améliorer la résistance à la

traction des connecteurs pour éviter les ruptures prématurées. De plus, il est crucial de trouver des alternatives durables à la refonte des composants en acier afin de réduire l'impact environnemental de ces processus.

### **1.12. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons exploré les divers comportements des poutres mixtes et souligné l'importance des connecteurs de cisaillement dans ces structures. Il est essentiel de sélectionner des connecteurs appropriés en fonction des exigences spécifiques de la structure. Les connecteurs de cisaillement peuvent entraîner différents modes de rupture tels que la rupture du béton, la rupture de l'acier ou une combinaison des deux. Le type de connecteurs utilisés détermine la nature de la rupture. Les connecteurs rigides conduisent principalement à la rupture du béton, tandis que les connecteurs ductiles provoquent des ruptures de l'acier ou des ruptures mixtes. Le test d'arrachement "Pull out" est couramment utilisé pour évaluer la résistance à l'arrachement des connecteurs de cisaillement. Des recherches ont été menées sur la résistance à l'arrachement des connecteurs de cisaillement, notamment l'étude de la performance en traction des goujons à tête avec section endommagée, l'analyse des forces d'arrachement dans les connecteurs de cisaillement des poutres composites avec des ouvertures d'âme, ainsi que le comportement des goujons soumis à des charges combinées de cisaillement et de traction. Ces travaux de recherche fournissent des informations précieuses sur la résistance à l'arrachement dans les poutres mixtes acier-béton.



## **CHAPITRE 2 : Modélisation numérique des essais Pull out**

### 2.1. Introduction :

Bien que les essais expérimentaux soient considérés comme fournissant des résultats plus précis et de grande valeur, leur coût élevé et leur besoin en temps sont des facteurs limitants. De plus, les essais ne peuvent pas prendre en compte tous les paramètres qui influencent le comportement de la structure. Ainsi, dans cette étude, un modèle numérique basé sur la méthode des éléments finis (FE) en trois dimensions a été développé pour simuler le comportement des structures composites avec des connecteurs de cisaillement en goujon à tête et en IPE80 perforé avec une barre passant par ce trou. Le logiciel d'éléments finis ABAQUS a été utilisé pour simuler l'essai d'arrachement ou « pull out test » et l'objectif principal était d'étudier le comportement des deux types de connecteurs dans les structures composites. Les résultats du modèle numérique pull out développé seront validés par des essais expérimentaux pull out sur des poutres composites acier-béton.

### 2.2. Généralités sur la modélisation de l'essai pull out :

Le programme ABAQUS (2012), qui est basé sur la méthode des éléments finis, a été utilisé dans cette étude pour simuler l'essai pull out en utilisant une approche statique générale pour l'analyse de la poutre en acier, la dalle en béton armé et les connecteurs de cisaillement en IPE80 perforé avec un trou circulaire ainsi que les goujons. Les essais expérimentaux menés par Zhaofer Lin [17] et Boursas.F[1] ont été utilisés pour développer un modèle en éléments finis. Les principaux composants des modèles en éléments finis comprenaient la dalle de béton de (32x26x12 cm), les armatures (4d8 mm) et les connecteurs de cisaillement (soit l'IPE80 perforé ou le goujon à tête de 19mm de diamètre) comme illustré dans la figure 1.16 et 1.17 Chacun de ces composants a été modélisé séparément puis assemblé pour former l'éprouvette pull out.

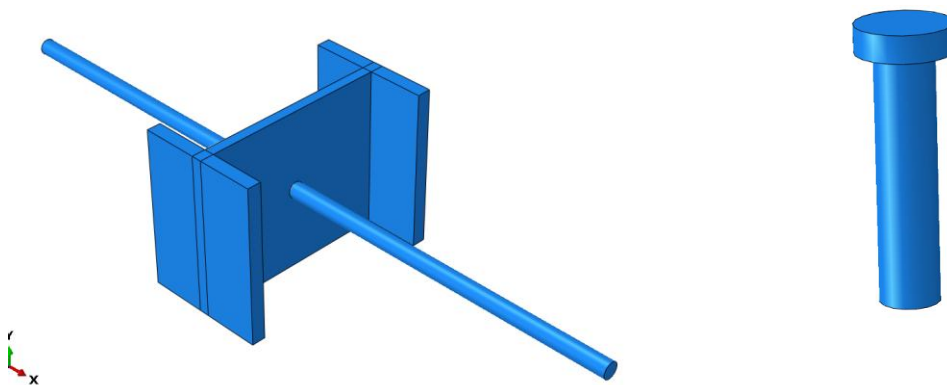


Figure 2. 1 Connecteurs de cisaillement Etudiés

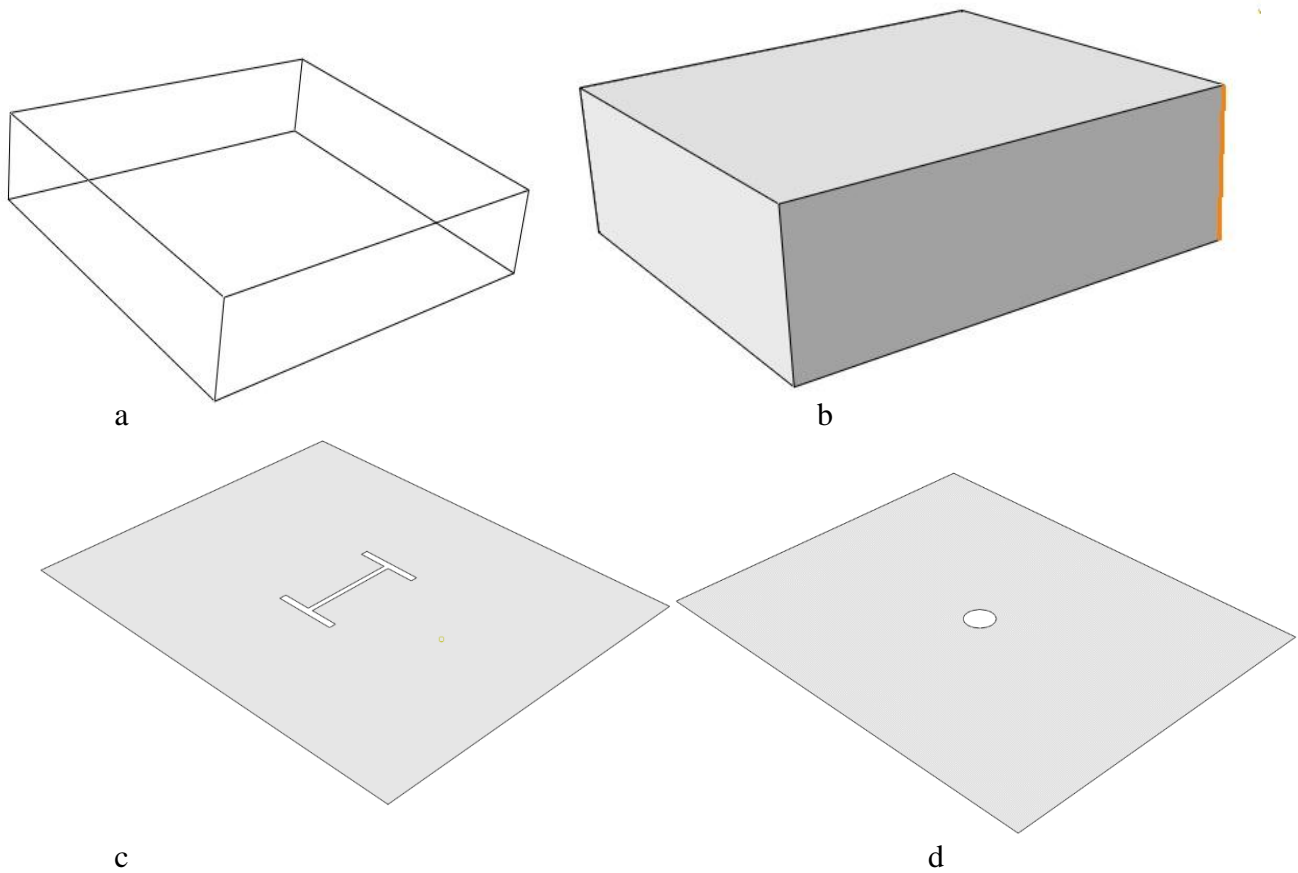
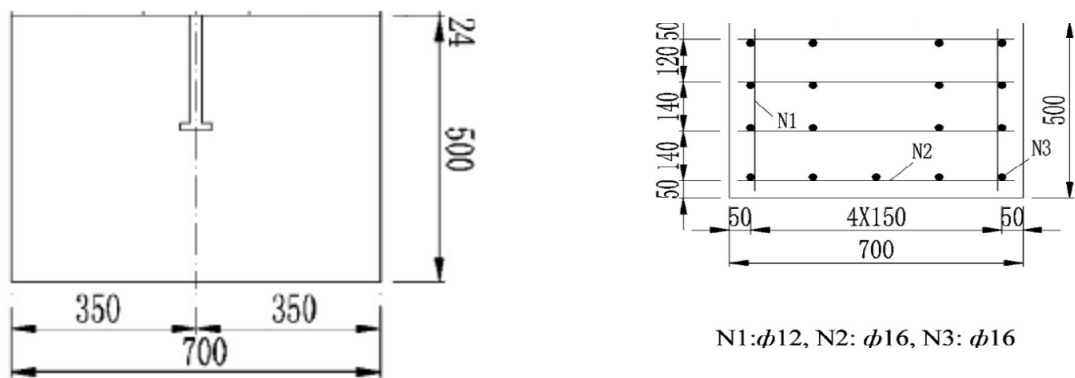


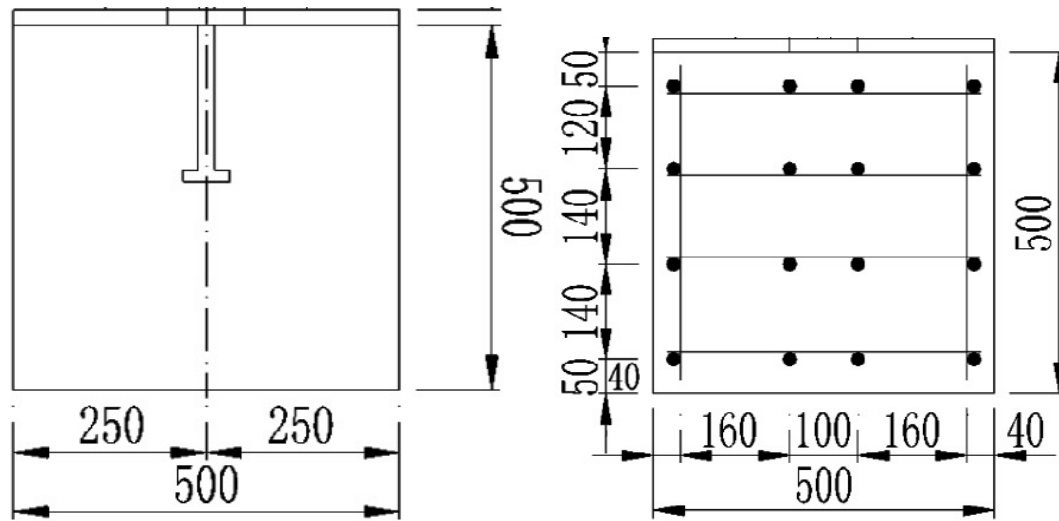
Figure 2. 2 Restes des composants du modèle éléments finis

### 2.3. Caractéristique géométrique et mécanique des modèles étudiés :

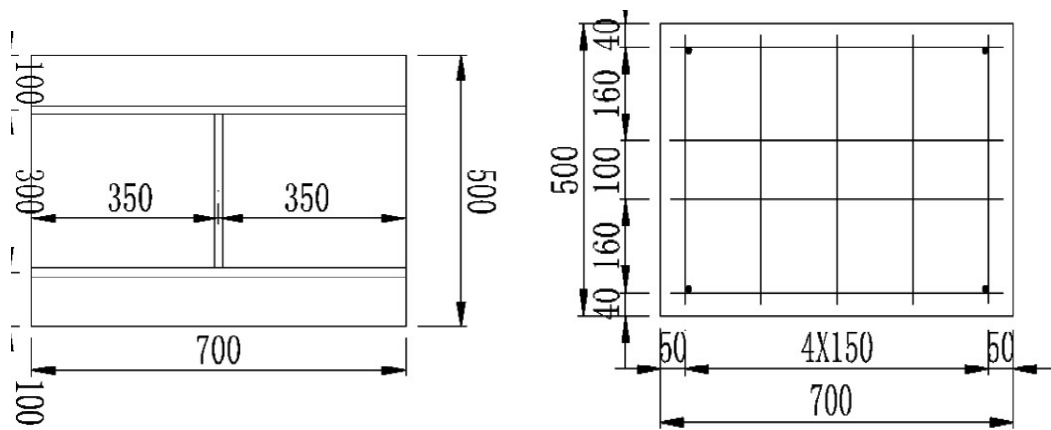
#### a) Goujon à tête :



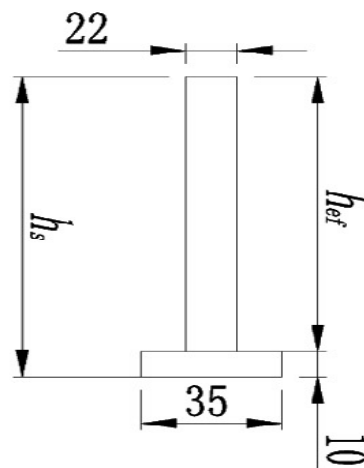
(a) vue de face



(b) vue de coté



(c) détail des éprouvettes arrachées



$h_s = 100, 200, 300$  et  $400$

(d) dimensions du goujon

**Figure 2. 3 détails des éprouvettes arrachées**

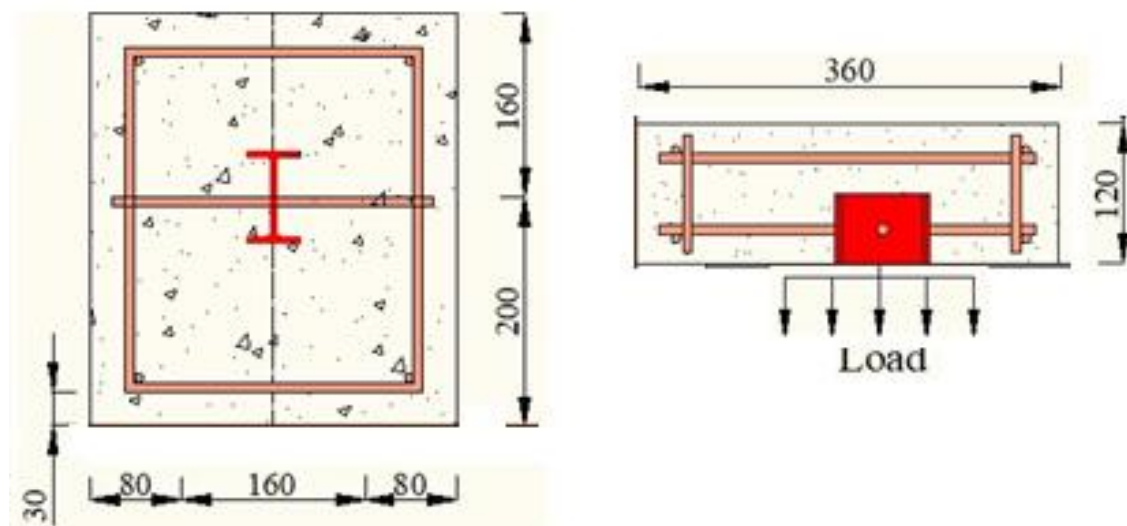
**Tableau 2. 1 propriétés physiques du béton**

Module d'élasticité ( $E_c$ ) en (GPa)	36,34
Résistance nominale à la compression en (MPa)	60,0
Résistance à la compression moyenne à 28 jours ( $f_{ck}$ , cube) en (MPa)	62.9

**Tableau 2. 2 Propriétés de l'acier de construction, des barres d'armature et du goujon de tête.**

Composantes	$E_s$ (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\sigma_{ru}$ (MPa)
Acier de construction	206	437	565
Barres d'armature	200	349	419
Goujon à tête	200	423	519

b) IPE perforé :

**Figure 2. 4 caractéristiques géométriques des éprouvettes**

**Tableau 2. 3 propriété des matériaux sur connecteurs IPE perforé**

La résistance de traction $f_{su}$ en (MPa)	360
Résistance a la compression $f_c$ en (MPa)	30
Limite d'élasticité de la barre d'armatures $f_{ry}$ en (MPa)	419
Limite d'élasticité de l'acier de construction $f_{sy}$	235

## 2.4. Modélisation des matériaux :

### 2.4.1. Modèle du béton :

Dans la simulation de l'essai pull out, le modèle du béton est d'une grande importance, car le béton est principalement sollicité en compression et en traction, comme cela a été observé lors de l'étude expérimentale. Les modes de ruine constatés étaient principalement dus à la rupture du béton. Il est donc essentiel de choisir un modèle de matériau approprié pour le béton afin d'obtenir des résultats précis dans le modèle en éléments finis.

Dans cette étude, le modèle plasticité-endommagement (CPD model ou concrète damage plasticité model) du béton intégré dans le logiciel ABAQUS [23] a été utilisé pour simuler le comportement du béton. Ce modèle peut prendre en compte le comportement du béton sous différentes charges, y compris les charges cycliques, et suppose que le béton est élastique et isotrope en traction et en compression pour représenter son comportement non linéaire.

Le modèle plasticité-endommagement peut être utilisé non seulement pour le béton, mais également pour les structures en béton armé soumises à des charges monotones, cycliques et dynamiques sous faible pression de confinement (ABAQUS, 2012). Il a été utilisé avec succès par Qureshi et Lam (2012, 2013) pour modéliser la dalle de béton dans des simulations numériques. Ce modèle peut traiter deux modes de rupture de base : l'écrasement par compression et la fissuration par traction du béton. Dans cette étude, le modèle plasticité-endommagement a été adopté, et la résistance à la traction maximale du béton a été fixée à 10 % de sa résistance à la compression.

### 2.4.2. Comportement élastique du béton :

Le module d'élasticité  $E_{cm}$  est un paramètre important pour la modélisation du béton. Dans cette étude, il a été calculé en utilisant la méthode de BS EN 1992-1-1, qui est une norme européenne pour le calcul des structures en béton. L'équation 3-1, qui est mentionnée dans le texte, est probablement une formule spécifique à cette norme pour le calcul du module d'élasticité. Les détails complets de cette formule ne sont pas donnés dans le texte.

Le coefficient de Poisson du béton est un autre paramètre important pour la modélisation. Il s'agit d'une mesure de la déformation transversale par rapport à la déformation longitudinale lorsqu'une contrainte est appliquée. Dans cette étude, le coefficient de Poisson a été pris comme 0,2, ce qui est une valeur courante pour le béton.

Enfin, la densité du béton a été considérée comme 2400 kg/m<sup>3</sup> dans la modélisation. Cela correspond à une densité typique pour le béton utilisé dans la construction. La densité est importante car elle peut avoir un impact sur la résistance et la rigidité de la structure en béton.

$$E_{cm} = 22 \left( \frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad 2-1$$

### 2.4.3. Le modèle plasticité-endommagement (CPD) :

#### ➤ Comportement en compression

L'Eurocodes 2 EN 1992-1-1[9] fournit une équation pour déterminer la contrainte compression du béton  $\sigma_c$  comme indiqué dans l'équation 3-2 sous compression uni axiale.

La relation contrainte-déformation du béton pour l'analyse non linéaire est montrée dans la figure

$$\frac{\sigma_c}{f_{em}} = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} \quad 2-2$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad 2-3$$

$\sigma_c$  = Contrainte de compression du béton

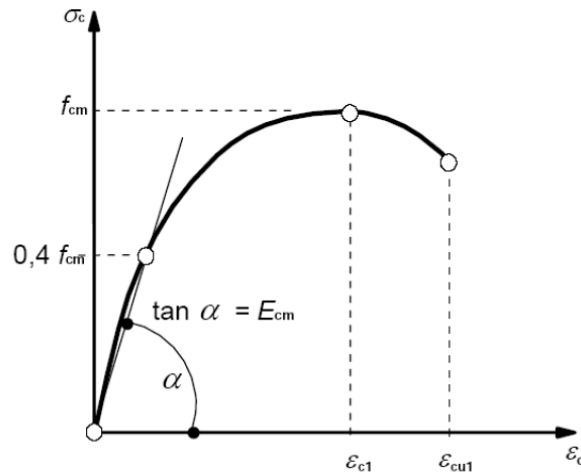
Où,  $f_{cm}$ , est la valeur moyenne de la résistance à la compression du cylindre de béton

Et  $f_{ck}$ , est la résistance cylindrique à la compression caractéristique du béton

$$k = \frac{1.05 E_{cm} |\varepsilon_{c1}|}{f_{cm}} \quad 2-4$$

$$E_{cm} = 22 \left[ \frac{f_{cm}}{10} \right]^{0.3} \quad 2-5$$

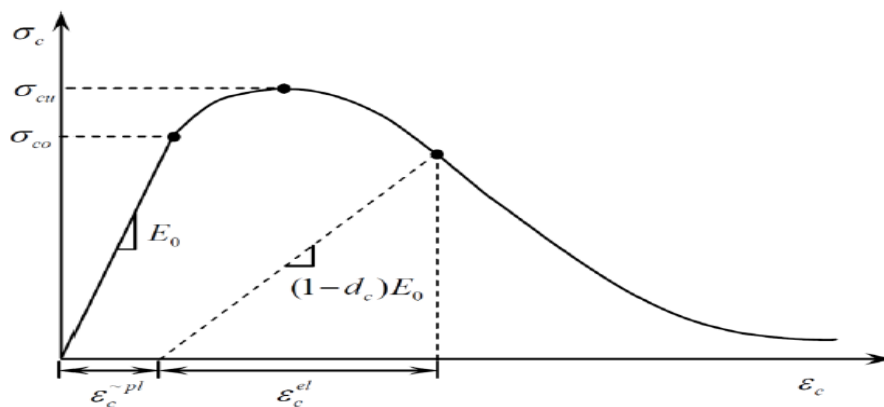
$$\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{e1}} \quad 2-6$$



**Figure 2. 5 relation contrainte-déformation du béton pour une analyse non linéaire EN 1992-1-1[9]**

La valeur de la déformation au pic  $\varepsilon_{c1}$  et de la déformation ultime nominale  $\varepsilon_{cu1}$  peuvent être respectivement de 0,0022 et 0,0035, selon la norme EN 1992-1-1, pour la résistance à la compression du cylindre de 12 à 50 MPa. La déformation ultime nominale  $\varepsilon_{cu1}$  pour le béton avec une résistance à la compression supérieure à 50MPa peut être calculée à l'aide de l'équation 3-7.

$$\varepsilon_{cu1} = 2.8 + 27 \left[ \frac{98 - f_{cm}}{100} \right]^4 \quad 2-7$$





### Figure 2. 6 courbe contrainte-déformation sous une charge de compression unie axiale

La figure 2.5 montre que le comportement du béton sous une charge de compression uni axial est linéaire jusqu'à ce qu'il atteigne sa limite d'élasticité initiale  $\sigma_{c0}$ . Au-delà de cette limite, le comportement devient plastique, avec un durcissement sous contrainte suivi d'un adoucissement une fois la contrainte de compression maximale  $\sigma_{cu}$  dépassée, comme indiqué par la figure 2.6. Lors de la décharge, la rigidité élastique du matériau semble être endommagée à chaque point, ce qui est connu sous le nom de « variable d'endommagement en compression »  $dc$ . La valeur de  $dc$  varie de 0 (pour un béton non endommagé) à 1 (pour un béton entièrement endommagé par compression) et peut être calculée à l'aide des équations 2-8 et 2-9 du manuel ABAQUS (2012) [23], en utilisant  $\sigma_{c0}$  comme la rigidité élastique pour le béton non endommagé et  $\varepsilon_c$  comme la déformation de compression totale.

$$\sigma_c = (1 - dc)E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{-pl}) \quad 2- 8$$

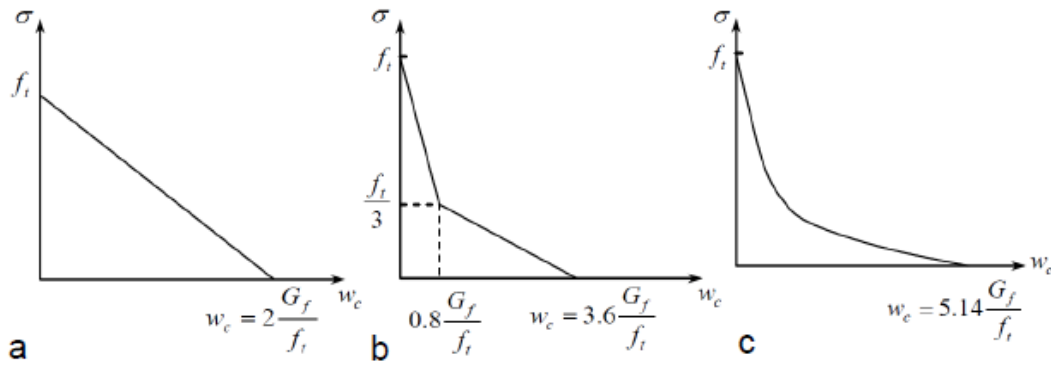
$$\varepsilon_c^{-in} = \varepsilon_c - pl + \frac{dc \sigma_c}{(1 - dc)E_0} \quad 2- 10$$

$\varepsilon_c^{-pl}$  : est la déformation plastique en compression

$\varepsilon_c^{-in}$  : est la déformation inélastique en compression

#### ➤ Comportement en traction du béton :

Il existe différentes manières d'exprimer le comportement en traction du béton, notamment linéaire, bilinéaire et exponentielle. Dans le manuel ABAQUS, une approche linéaire est proposée et représentée par la figure (2.7 a). Hillerborg[24] (1985) a développé une relation bilinéaire, représentée par la figure (2.7.b). Pour sa part, Cornelissen et al. (1986)[25] ont présenté un modèle de relation exponentielle pour le comportement en traction du béton, qui est illustré par la figure (2.7.c).



**Figure 2. 7 Modèles de traction du béton (a) linéaire (b) bilinéaire (C) exponentiel**

Comme mentionné dans les sections précédentes, la résistance à la traction axiale du béton est calculée conformément à la norme EN 1992-1-1 et la résistance à la traction maximale a été prise comme 10 % de la résistance à la compression. La variable d'endommagement en traction  $d_t$  est calculée à l'aide de l'équation 2-10. Le déplacement de fissuration  $w$  est obtenu à partir de l'équation 2-11 en utilisant les équations 2-12 à 2-14.

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t}{f_t} \quad 2-12$$

$$\frac{\sigma_c}{f_t} = f(w) - \frac{w}{w_c} f(w_c) \quad 2-13$$

$$f(w) = \left[ 1 + \left( \frac{c_1 w}{w_c} \right)^3 \right] \exp \left( 1 - \frac{c_2 w}{w_c} \right) \quad 2-14$$

$$w_c = 5.14 \frac{G_f}{f_t} \quad 2-15$$

$$G_f = 73 [f_{cm}]^{0.18} \quad 2-16$$

Le paramètre  $C_1$  est fixé à une valeur de 3,0 tandis que  $C_2$  est égal à 6,93 pour le béton de densité normale. Ces valeurs sont importantes pour déterminer l'énergie de rupture  $G_f$ , qui représente l'énergie nécessaire pour créer une fissure qui se propage à travers tout le matériau. Lorsque le matériau est complètement endommagé, aucun transfert de contrainte de traction ne peut se

produire, ce qui signifie que le déplacement de fissure est maximal et que la rupture est imminente. Pour calculer l'énergie de rupture  $\sigma_{bo}/\sigma_{co}$ , l'équation 2-14 du Code de conception CEB\_FIP MC 2010 est utilisée. Cette équation est une expression mathématique qui permet de calculer l'énergie de rupture en fonction des propriétés du matériau et des conditions de charge appliquées.

#### 2.4.4. Paramètres de plasticité retenus :

Pour utiliser le modèle plasticité-endommagement du béton (CDP) fourni par le logiciel ABAQUS, cinq paramètres doivent être déterminés. L'angle de dilatation est un paramètre de matériau qui contrôle la déformation plastique du béton et évalue l'inclinaison du potentiel plastique sous haute pression de confinement. Il est également défini comme l'angle de frottement interne du béton. L'angle de dilatation a été itérativement calibré pendant l'analyse pour obtenir les meilleurs résultats et il a été trouvé que la valeur de 31 donnait les meilleurs résultats.

L'excentricité est un paramètre qui définit le taux de potentiel d'écoulement hyperbolique. La valeur par défaut recommandée par ABAQUS 2012[23] a été utilisée dans cette analyse. Le rapport de la résistance du béton à l'état bi axial à celle à l'état uni axial est un autre paramètre important. Pour le modèle proposé, la valeur de 1,16, qui est la valeur par défaut dans ABAQUS, a été choisie.

Le paramètre de viscosité est utilisé pour la régularisation viscoplastique du béton. Dans cette analyse, la valeur choisie pour ce paramètre est égale à 0,1. Le tableau 4 résume les cinq paramètres mentionnés ci-dessus.

**Tableau 2. 4 Paramètres de plasticité**

Angle de dilatation	Excentricité	$\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$	$K_c$	Les paramètres de viscosité
31	0.1	1.16	0.67	0.1

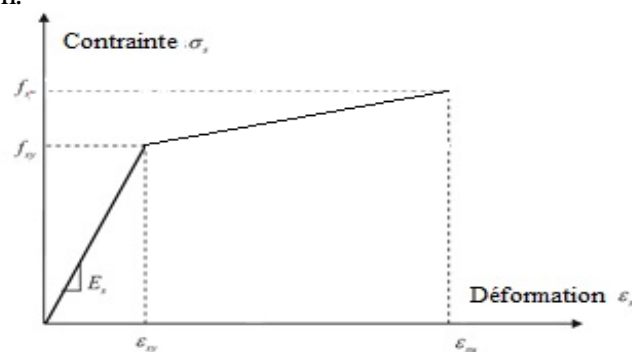
Où  $\sigma_{b0}/\sigma_{c0}$  est le rapport de la limite d'élasticité initiale en compression équibi axiale à la limite d'élasticité en compression uni axial initiale,  $K_c$  est le rapport invariant de la deuxième contrainte en traction à celui en compression.

## 2.5. Modélisation des éléments en acier :

Dans cette partie, les propriétés mécaniques des différents éléments de la structure ont été déterminées à l'aide d'essais de traction sur des coupons d'IPE 80 et sur un goujon. Pour l'acier, la relation contrainte-déformation a été idéalisée en utilisant les résultats d'essais de traction, et en suivant la relation typique de l'Eurocodes 2 qui commence par une partie élastique linéaire jusqu'à la limite d'élasticité, puis un palier d'écrouissage linéaire jusqu'à la résistance ultime. Le module d'élasticité de l'acier ( $E_s$ ) a été pris égal à 210 GPa.

Pour les connecteurs de cisaillement en IPE80, trois essais sur coupons ont été effectués pour déterminer les propriétés mécaniques, à savoir la limite d'élasticité ( $f_y$ ) et la résistance ultime à la traction ( $f_u$ ). Ces valeurs ont été utilisées pour la modélisation par éléments finis des connecteurs de cisaillement en I.

Les propriétés mécaniques des goujons à tête et des barres d'armature ont également été déterminées à l'aide des essais en utilisant trois échantillons pour chaque type. Les résultats ont été utilisés pour la modélisation.



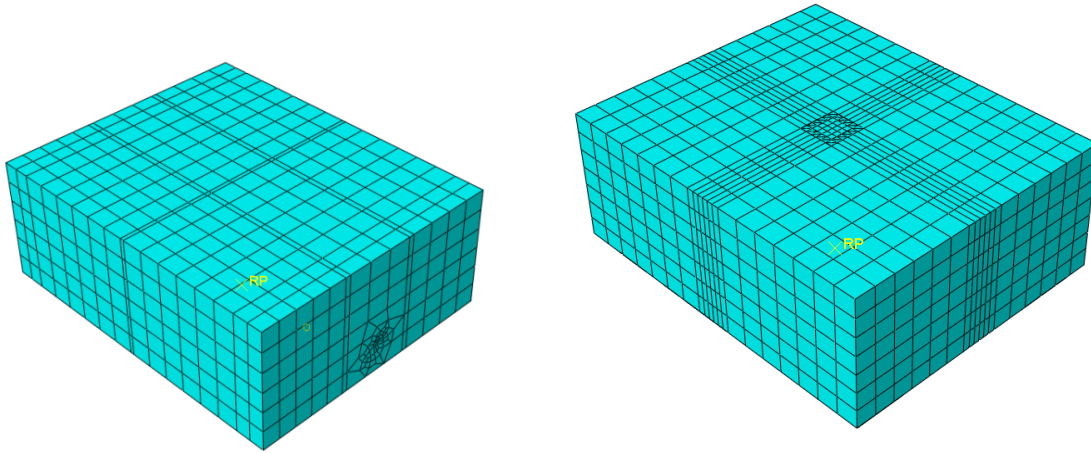
**Figure 2. 8 Relation contrainte-déformation pour les connecteurs en I, l'acier de construction et les armatures [24]**

### 2.5.1. Type d'éléments finis et maillage :

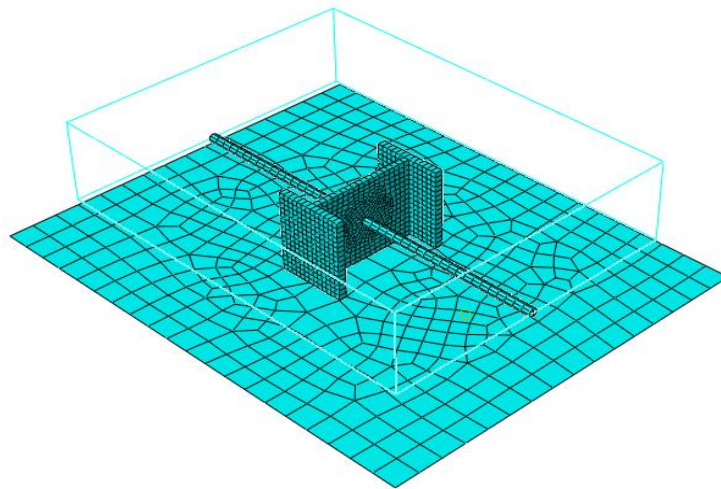
Les éléments tridimensionnels en briques pleines à huit nœuds C3D8R avec une intégration réduite sont adoptés pour mailler la dalle de béton, le connecteur de cisaillement en IPE80 et la barre d'anti soulèvement pour le premier modèle, et de même pour la dalle de béton, le goujon à tête pour le deuxième modèle. Dans ces éléments, chaque nœud a 3 degrés de liberté en translation (DOF). Les éléments de brique donnent une solution de précision comparable à un meilleur taux de convergence et moins de temps de calcul que les autres éléments.

Un élément en treillis à deux nœuds T3D2 est utilisé pour les barres d'armature. L'élément en treillis dans ABAQUS[23] peut être utilisé en deux ou trois dimensions pour présenter un élément structurel mince qui résiste et ne transfère que les forces axiales. Il peut également être utilisé pour modéliser des composants où la déformation est calculée à partir du changement de longueur

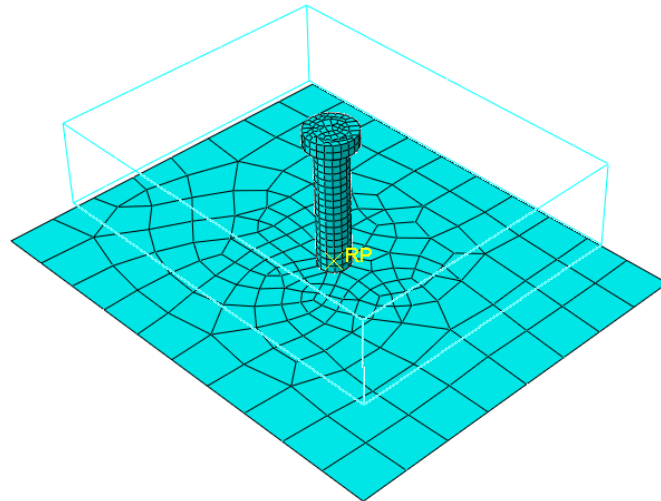
(ABAQUS, 2012). L'avantage d'utiliser un élément en treillis est que la liaison parfaite peut facilement être définie en enrobant les barres d'acier dans une région hôte (dalle du béton dans notre cas).



**Figure 2. 9 Maillage en éléments finis du spécimen pull out**



**Figure 2. 10 Maillage de la base rigide, le connecteur en IPE80, la barre d'anti soulèvement et les armatures du premier modèle**

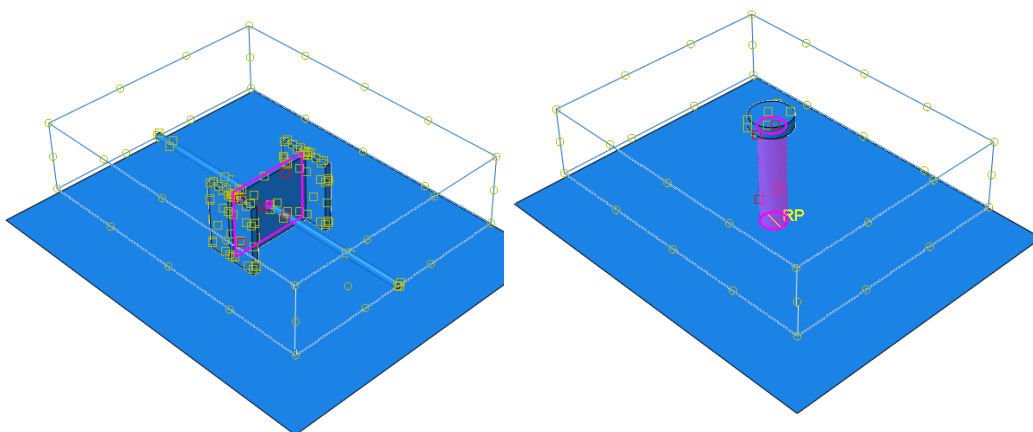


**Figure 2. 11 Maillage de la base rigide, le goujon à tête et les armatures du second modèle**

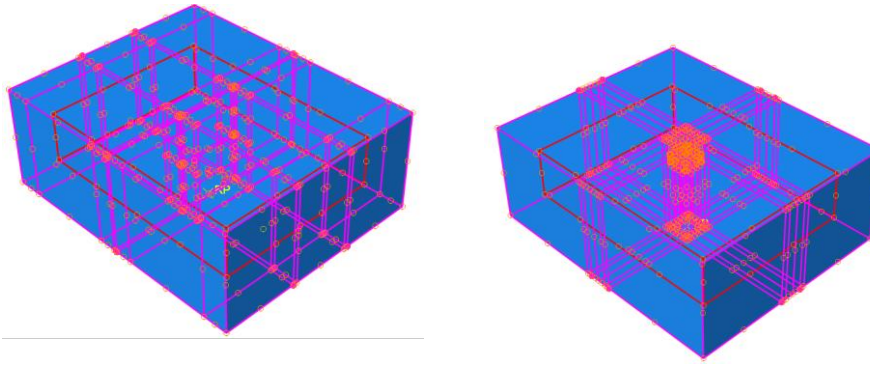
### 2.5.2. Conditions d'interaction et de contacts :

Une fois que toutes les pièces du modèle d'essai pull out sont assemblées comme illustré à la figure 2.12 les interactions de contact appropriées sont définies entre surfaces d'interaction des différents composants. La méthode des paires de contacts est utilisée pour définir le contact « surface à surface » entre la dalle de béton, les connecteurs de cisaillements (IPE80 perforé et goujon à tête), les barres d'armature. Dans les essais expérimentaux pull out, la surface de la base rigide en contact avec la dalle de béton est généralement graissée pour réduire le frottement. Dans notre modèle numérique, une interaction de contact sans frottement a été appliquée aux surfaces de la base rigide et de la dalle en béton.

Une interaction de contact a été utilisée pour l'interface du connecteur en forme I et la dalle en béton armé, le coefficient de frottement a été pris à 0,20. Les barres d'armature situées à l'intérieur de la dalle de béton, comme le montre la figure 2.13 La contrainte intégrée (embeddedconstrain) été appliquée aux barres d'armature et à la dalle en béton.



**Figure 2. 12 Contact sans frottement entre la dalle en béton et les connecteurs de cisaillements**



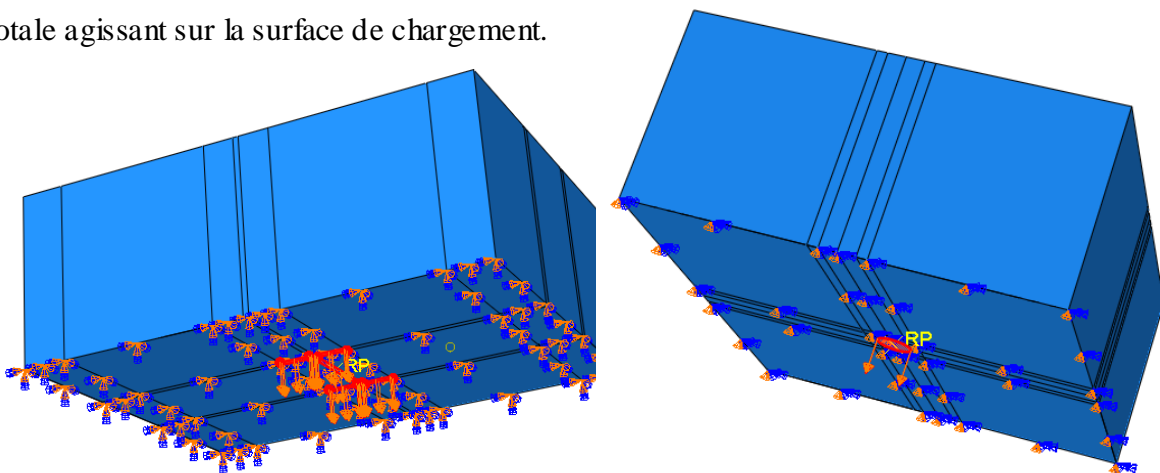
**Figure 2. 13 Contact intégré (*Embedded constraints*) entre la dalle en béton et les armatures**

Le comportement normal est supposé être dur car cela permet une pénétration minimale de la surface « esclave » dans la surface principale « maitre ». La méthode de pénalité est utilisée pour définir le frottement tangentiel avec un coefficient de frottement égale à 0,20, et qui donnent des résultats plus fiables par rapport aux résultats expérimentaux.

#### **2.6. Chargement et conditions aux limites :**

La base rigide est supposée immobile, donc tous les degrés de libertés du nœud de référence de la base rigide sont restreints.

Dans cette analyse un déplacement imposé est appliqué à la surface inférieure des connecteurs de cisaillements à savoir (IPE80 perforé et goujon à tête), comme le montre la figure 2.14 Le glissement a été mesurée comme le déplacement relatif entre les nœuds sur les connecteurs de cisaillements en IPE80 perforé et le goujon à tête. La charge a été mesurée comme la réaction totale agissant sur la surface de chargement.



**Figure 2. 14 Chargement appliqué au spécimen pull out**

**2.7. Méthode d'analyse :**

La méthode RIKS a souvent été utilisée pour étudier le comportement de la connexion lors d'un essai pull out. La méthode RIKS est généralement utilisée pour prédire l'effondrement instable et non linéaire d'une structure. C'est une méthode de contrôle de charge implicite. Dans la méthode RIKS, la charge est appliquée proportionnellement en plusieurs étapes de charge. À chaque étape de charge, l'itération d'équilibre est effectuée et le chemin d'équilibre est suivi dans l'espace charge-déplacement. Cette méthode est souvent utilisée en analyse statique et s'avère être une méthode efficace pour l'analyse non linéaire. Cependant, en raison de l'itération d'équilibre, la méthode RIKS consomme beaucoup de temps et de ressources informatiques pour un modèle relativement grand. De plus, le problème de convergence est souvent rencontré lorsque les endommagements du matériau et la rupture sont inclus et que la charge ultime n'a donc pas pu être atteinte. C'est pourquoi nous avons appliqué une stabilisation automatique en utilisant un facteur d'amortissement à partir l'étape générale précédente égale à 0.50.

**2.8. Résultats numériques :**

À l'aide d'un modèle d'éléments finis 3D, nous pouvons déterminer la résistance à l'arrachement et la courbe charge-soulèvement pour toutes les connecteurs proposés en utilisant les mêmes échantillons utilisés dans les programmes expérimentaux avec des connecteurs de cisaillement en IPE80.

**2.9. Validation du modèle éléments finis :**

Les résultats numériques obtenus ont été comparés aux résultats des tests expérimentaux. La comparaison dans les figures montre que le modèle d'éléments finis 3D établi au cours de cette étude est capable de prédire efficacement la résistance à l'arrachement et la courbe charge-soulèvement pour les essais pull out avec des connecteurs en IPE80 perforé et le goujon à tête.



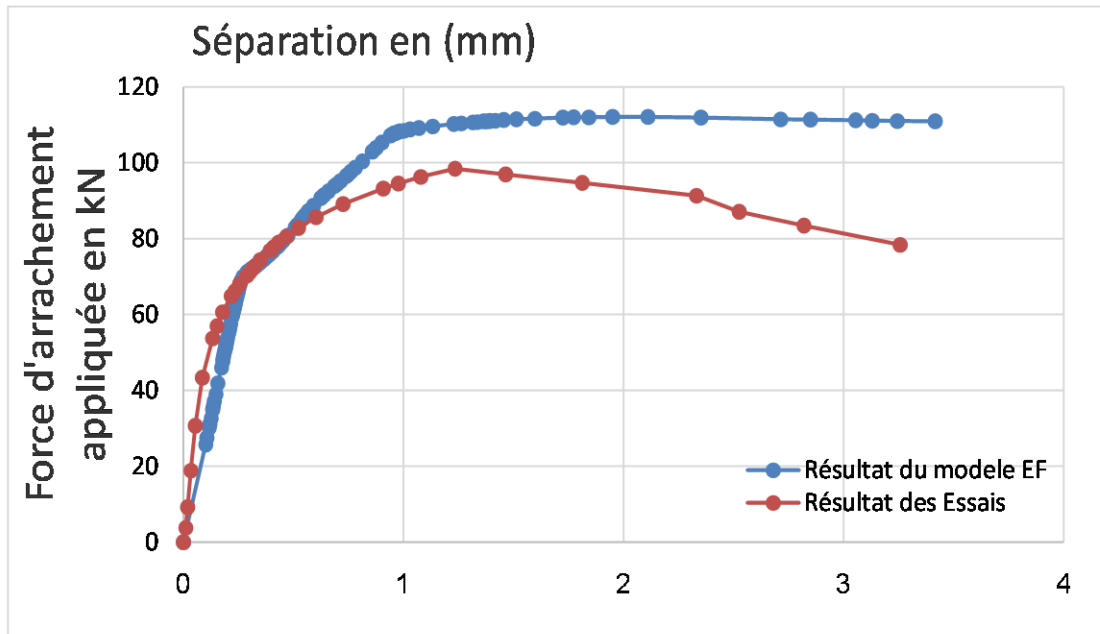


Figure 2. 15 Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux pour les connecteurs goujons à tête

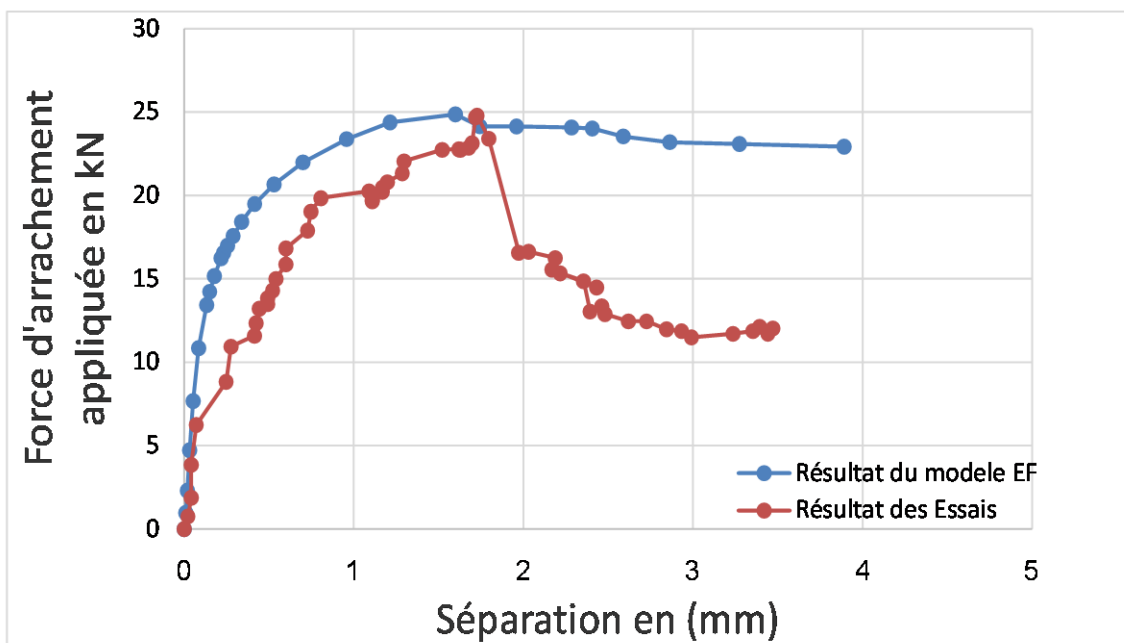


Figure 2. 16 Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux pour les connecteurs en IPE80 perforé avec une barre d'anti soulèvement

Il est montré que dans le régime linéaire les résultats des éléments finis sont en bon accord avec les résultats des essais et divergent légèrement des résultats des tests dans le régime non linéaire pour les connecteurs IPE80 perforé avec une barre d'anti soulèvement étudiés. Cependant, les courbes numériques prennent la forme d'un écoulement plastique et divergent des courbes expérimentales après avoir atteint la charge ultime. Ce comportement peut s'expliquer par le comportement du matériau acier adopté dans le modèle éléments finis qui était un comportement élastique parfaitement plastique bilinéaire.

Le tableau 2.5 montre la résistance à l'arrachement obtenue expérimentalement et les résultats de glissement maximum par rapport aux résultats d'analyse par éléments finis.

**Tableau 2. 5 Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux**

Spécimens	Résultats expérimentaux		Résultats numériques		Comparaison	
	Soulèvement $\Delta_{test}$ (mm)	Charge ultime P test (KN)	Soulèvement $\Delta_{test}$ (mm)	Charge Ultime $P_{EF}$ (KN)	$\Delta_{test}/\Delta_{EF}$	$P_{test}/P_{EF}$
IPE80 perforé avec une barre d'anti soulèvement	3.47	24.79	3.89	24.86	0.892	0.997
Goujons à tête	3.25	98.46	3.41	112.1	0.953	0.878

D'après les résultats répertoriés dans le tableau 2.5 les valeurs moyennes des rapports ( $P_{test}/P_{EF}$ ) et ( $\Delta_{test}/\Delta_{EF}$ ) sont respectivement de 0,938 et 0,923.

---

**2.10. Conclusion :**

En conclusion, la modélisation par éléments finis a permis de développer un modèle numérique non linéaire pour étudier le comportement des connecteurs de cisaillement en IPE80 perforé avec une barre d'anti soulèvement et les Goujons à tête. Les résultats de l'étude numérique ont montré que le modèle d'éléments finis a produit un comportement similaire à celui observé dans les essais de Zhao-fei Lin[17] et Boursas.F[1], ce qui indique la validité et la fiabilité du modèle.

En outre, la technique implicite a été utilisée pour résoudre le problème statique en appliquant un déplacement imposé, ce qui a permis de résoudre les problèmes non linéaires et de contact discontinu. Cette technique est donc appropriée pour la simulation de l'essai pull out avec connecteurs de cisaillement en I. Enfin, la modélisation par éléments finis a été identifiée comme une technique efficace pour effectuer une étude paramétrique dans le chapitre suivant, ce qui suggère que cette technique peut être utilisée pour explorer différentes conditions expérimentales et aider à la conception de futurs essais de pull out.

**CHAPITRE 3 :**  
**Vérifications et Interprétation des résultats**

## **1. Introduction :**

Le présent chapitre se concentre sur l'interprétation des résultats obtenus à partir de l'analyse numérique réalisée dans le chapitre précédent. L'analyse portait sur la distribution des contraintes dans les deux types de connecteurs étudiés, à savoir les goujons à tête et les IPE perforés, ainsi que sur l'identification des modes de rupture prédominants dans chaque cas. L'analyse des courbes charge-séparation permettra également de déterminer la résistance des connecteurs à mesure que la charge augmente et la séparation se produit.

Une attention particulière sera accordée à la vérification de la charge ultime d'arrachement par rapport à la charge ultime de cisaillement pour les deux types de connecteurs. Selon les recommandations de l'Eurocodes 4, il est recommandé que la charge ultime d'arrachement soit supérieure ou égale à 10% de la résistance ultime de cisaillement. Par conséquent, il est important de déterminer si les valeurs obtenues dans nos simulations respectent cette limite critique. La compréhension approfondie des résultats de l'analyse numérique et la vérification des charges ultimes revêtent une grande importance pour l'application pratique des connecteurs étudiés. Ces informations contribueront à la prise de décisions éclairées lors de la conception et de la construction de structures utilisant ces types de connecteurs.

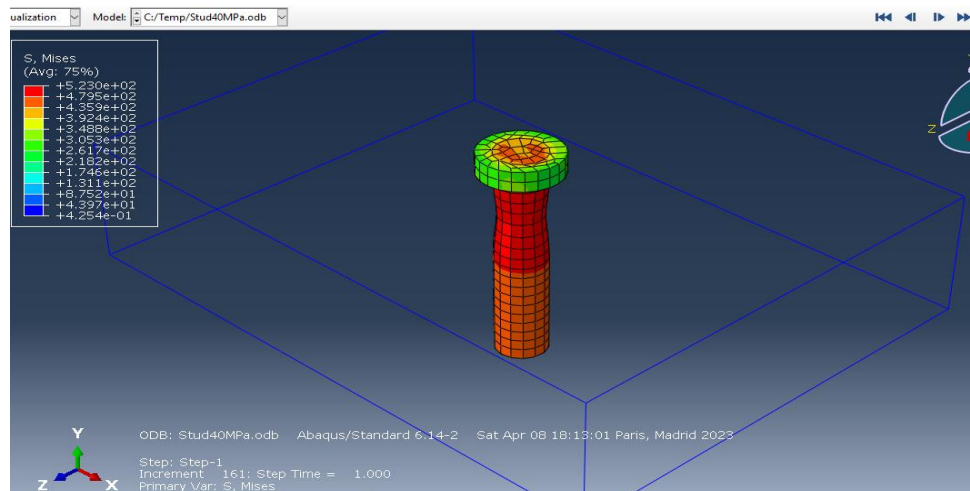
### **1.1. Résultats de la simulation numérique :**

Les résultats obtenus à partir de la simulation numérique faite dans le chapitre précédent ont fourni des informations précieuses sur le comportement des goujons à tête et des IPE perforés sous des charges d'arrachement. Dans cette partie, nous présenterons une interprétation détaillée de ces résultats, mettant en évidence les contraintes subies par ces composants dans des conditions d'arrachement. Cette interprétation des résultats permettra de mieux comprendre les mécanismes de rupture et les limites de charge des goujons à tête et des IPE perforés lorsqu'ils sont soumis à des forces d'arrachement.

#### **a) Goujon à tête :**

Lors de la modélisation numérique de l'essai pull out avec comme connecteur de cisaillement des goujons à tête soumis à des charges d'arrachement, plusieurs observations significatives ont été faites. L'une des conclusions principales est la concentration de contrainte au-dessous de la tête du goujon. Lorsque le goujon est soumis à une charge d'arrachement, une concentration de contrainte se forme dans cette zone comme le montre la figure 32, ce qui peut entraîner des déformations excessives et des ruptures locales. Cette concentration de contrainte sous la tête du goujon lors de sa simulation numérique peut être expliquée par plusieurs facteurs. Tout d'abord, il est important de noter qu'une adhérence existe généralement entre la tête du goujon et la dalle en béton dans laquelle il est ancré. Cette adhérence crée une interface de contact solide, qui bloque efficacement les forces normales

de traction. Cependant, le reste du goujon, notamment la tige, est généralement lisse et ne présente pas la même adhérence que la tête. En conséquence, les forces de traction appliquées à la tige du goujon peuvent être moins uniformément réparties, ce qui crée une répartition inégale des contraintes le long de sa longueur. De plus, la géométrie de la tête du goujon peut également jouer un rôle dans la concentration de contrainte. Si la forme de la tête n'est pas optimisée pour une répartition uniforme des forces, des zones de contrainte accrue peuvent se former, ce qui augmente le risque de déformation excessive et de rupture localisée.



**Figure 3. 1 modèle du goujon a tête**

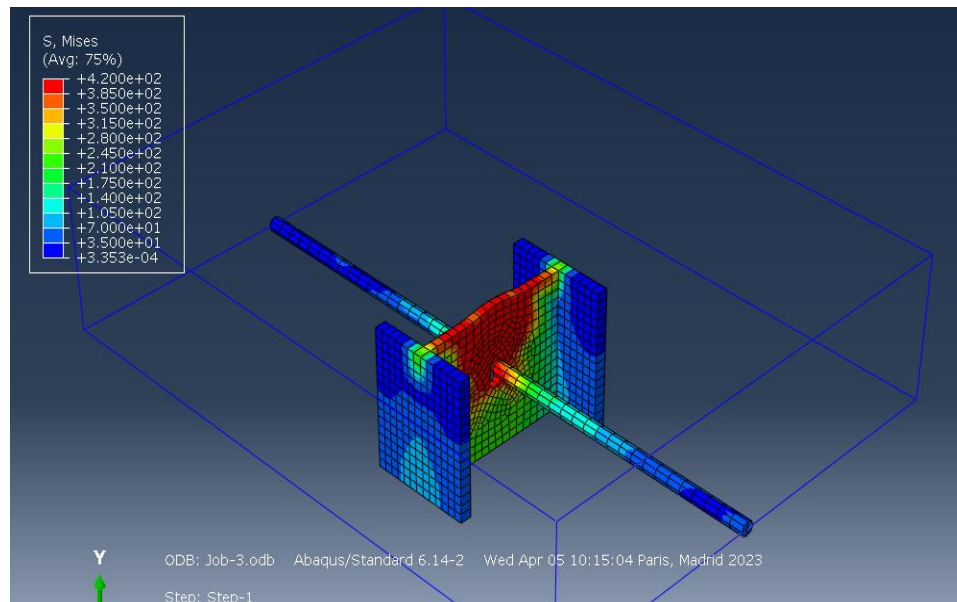
Une autre observation importante concerne la réduction de la section transversale de la tige du goujon comme le montre la figure 3.1, qui a un impact significatif sur son comportement. Il a été démontré que la réduction de la section transversale de la tige du goujon a été observée quand la force d'arrachement atteindrait la charge ultime de 112 kN et qui a conduit à une diminution de sa capacité de résistance à l'arrachement puis la rupture du goujon. En effet, la section réduite limite la quantité de matériau disponible pour résister aux forces de traction appliquées. Par conséquent, la capacité de charge du goujon est réduite, ce qui peut compromettre la stabilité de la structure.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte la géométrie et la section transversale du goujon lors de la conception et de l'installation. Il est crucial de choisir un goujon avec une section adéquate pour résister aux charges d'arrachement prévues et d'assurer une distribution uniforme des contraintes pour éviter les concentrations excessives.

### **b) IPE perforé :**

Lors de la modélisation numérique de l'essai pull out avec des connecteurs de cisaillement en IPE perforé et une barre d'anti-soulèvement, plusieurs observations importantes ont été faites. En particulier, une concentration de contrainte au niveau du trou dans l'IPE perforé a été

observée voir la figure 3.2, ce qui a ensuite conduit à un élargissement du trou. La concentration de contrainte au niveau du trou dans l'IPE perforé peut être attribuée à plusieurs facteurs. Tout d'abord, il a été constaté que les caractéristiques mécaniques de la barre d'anti-soulèvement étaient plus résistantes que celles de l'IPE perforé. En conséquence, lorsque la charge de traction était appliquée, une grande partie de cette charge était transmise à la barre, ce qui créait une contrainte accrue autour du trou de l'IPE perforé.



**Figure 3. 2 modèle IPE perforé**

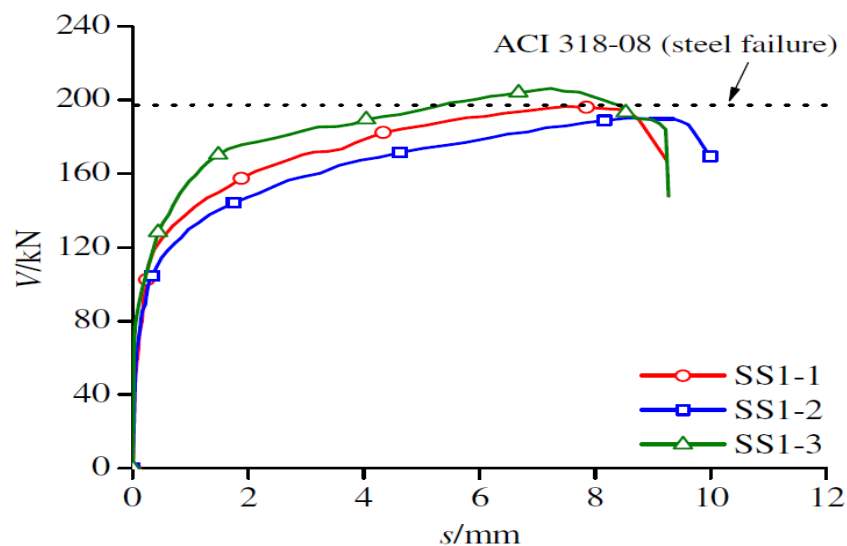
De plus, il convient de noter que l'IPE80, en raison de son épaisseur relativement mince, était plus susceptible de subir un élargissement du trou sous l'effet de la charge de traction appliquée. L'interaction entre la barre d'anti-soulèvement et l'IPE perforé, combinée à la contrainte concentrée, a provoqué un élargissement du trou dans l'IPE. Cet élargissement du trou a été suivi d'une légère déformation au niveau de la barre passant par le trou. La contrainte accrue dans l'IPE perforé a entraîné une déformation locale de la barre, ce qui peut avoir un impact sur la performance globale du système de connexion.

Ces résultats soulignent l'importance de prendre en compte les caractéristiques mécaniques des différents composants et la géométrie de la structure lors de la conception et de l'installation de connecteurs de cisaillement en IPE perforé avec une barre d'anti-soulèvement. Il est crucial d'évaluer la compatibilité des matériaux et de dimensionner correctement les composants afin de minimiser les concentrations de contrainte et les déformations indésirables.

## 1.2. Travail expérimental sur la résistance au cisaillement et à l'arrachement des goujons à tête et IPE perforé :

### a) Goujon à tête :

Les travaux de recherche réalisés par Zhaofei Lin[17] portent sur la résistance au cisaillement des goujons à tête soumis à des charges combinées de cisaillement et arrachement. Pour mener cette étude, douze éprouvettes d'arrachement « pull out », six éprouvettes d'arrachement « push out » et douze éprouvettes de poussée modifiée ont été préparés et testées. Les modes de rupture dans différentes conditions de chargement ont été présentés et comparés. En se basant sur les soixante-seize résultats d'essais obtenus dans cette étude et ceux disponibles dans la littérature, une équation améliorée pour l'interaction contrainte-cisaillement est proposée par Zhaofei Lin[17]. De plus, des expressions permettant de calculer le facteur de réduction de la rigidité au cisaillement et de prédire la relation charge-glissement sont également développées.

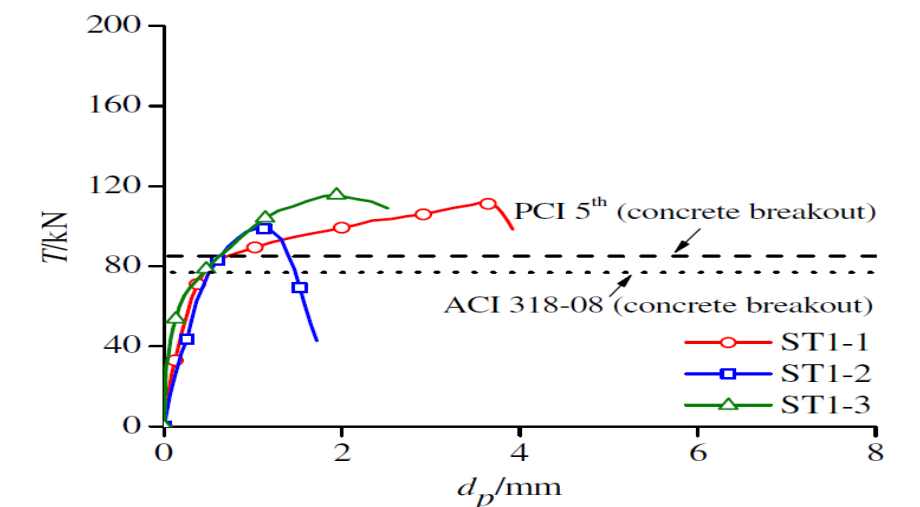


**Figure 3. 3 Courbes de l'essai Push out des goujons testés par Zhaofei Lin[17]**

Les résultats indiquent qu'avec une augmentation de la force de traction appliquée, à la fois la rigidité au cisaillement et la résistance au cisaillement diminuent significativement. Le facteur de réduction de la rigidité au cisaillement et l'expression de la charge-glissement proposés prennent en compte l'influence de la force de traction et du glissement maximal, ce qui permet de faire des prédictions plus raisonnables de la rigidité au cisaillement et de la courbe charge-glissement sous chargement de cisaillement. L'équation proposée pour l'interaction contrainte-cisaillement est capable de prédire plus précisément la résistance à l'interaction, comparée à d'autres équations disponibles dans la littérature, et suggère que les effets d'interaction peuvent être négligés lorsque la force de cisaillement ou de traction est



inférieure à 10% de la résistance ultime sous cisaillement pur ou traction pure, respectivement.



**Figure 3. 4 Courbes de l'essai Pull out des goujons testés par Zhaofei Lin[17]**

La rigidité au cisaillement des goujons diminue à mesure que la force de traction appliquée augmente. Les pourcentages de réduction moyens sont d'environ 47%, 62% et 77% pour les goujons de 200 mm de hauteur et de 48%, 69% et 72% pour les goujons de 300 mm de hauteur lorsque la force de traction appliquée représente respectivement 20%, 40% et 60% de la résistance moyenne en traction testée sous traction pure.



(a) steel surface



(b) concrete surface

**Figure 3. 5 modes de rupture**

Pour les goujons à tête soumis à une traction, deux modes de rupture sont observés en fonction du rapport hauteur-diamètre total : rupture du béton pour un rapport de 4,55 et rupture de la tige du goujon pour un rapport entre 9,09 et 18,18. Les recommandations de l'ACI 318-08 donnent une résistance en traction conservatrice pour la rupture du béton, mais surestiment la résistance pour la rupture de la tige du goujon.

**b) IPE perforé :**

Les travaux de recherche réalisés par F. Boursas[1] portent sur la résistance au cisaillement des connecteurs en profilé en IPE perforé. Les courbes charge-glissement des connecteurs en IPE perforés avec des barres d'anti-soulèvement de 6 mm (IPE6C) et de 8 mm (IPE8C) sont présentées, mettant en évidence leur comportement.

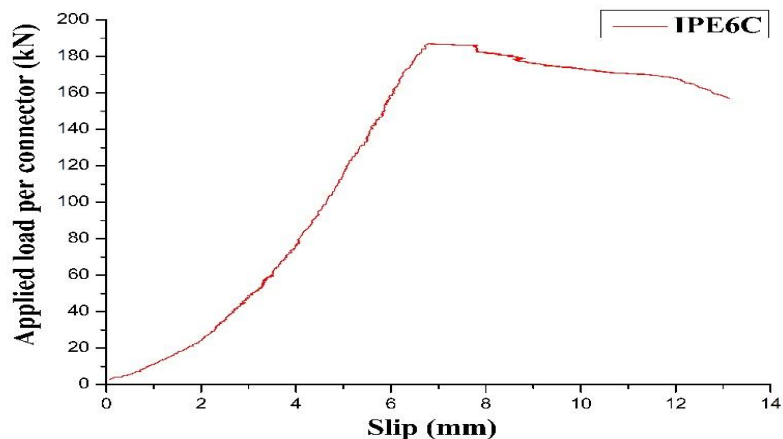


Figure 3. 6 Courbe charge-glissement pour IPE6C

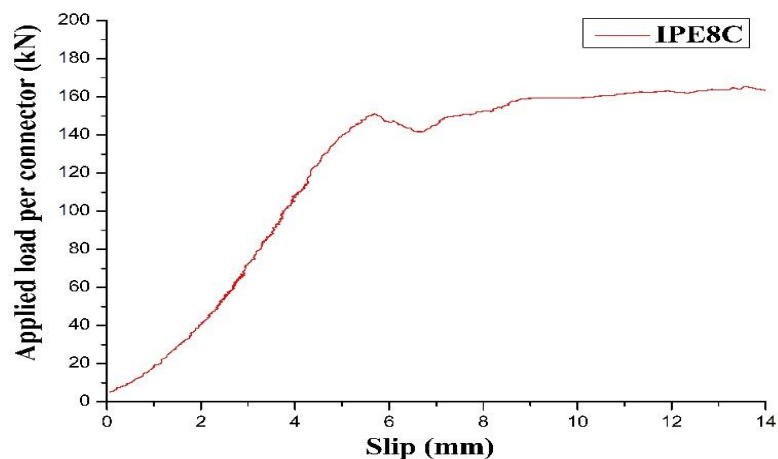


Figure 3. 7 Courbe charge-glissement pour IPE8C

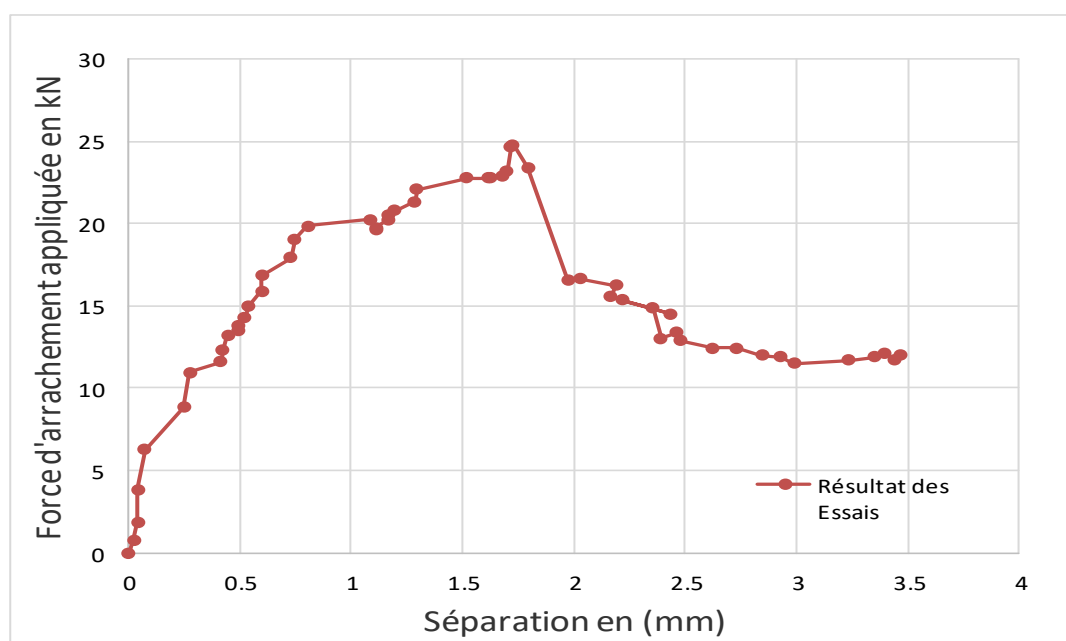
L'étude expérimentale montre que les connecteurs en IPE perforé présentent une ductilité suffisante soit plus de 6 mm recommandé par l'Eurocodes 4 [9], et la barre d'anti-soulèvement entraîne une diminution de la charge ultime de cisaillement pour les connecteurs en IPE, mais améliore la ductilité des connecteurs étudiés.



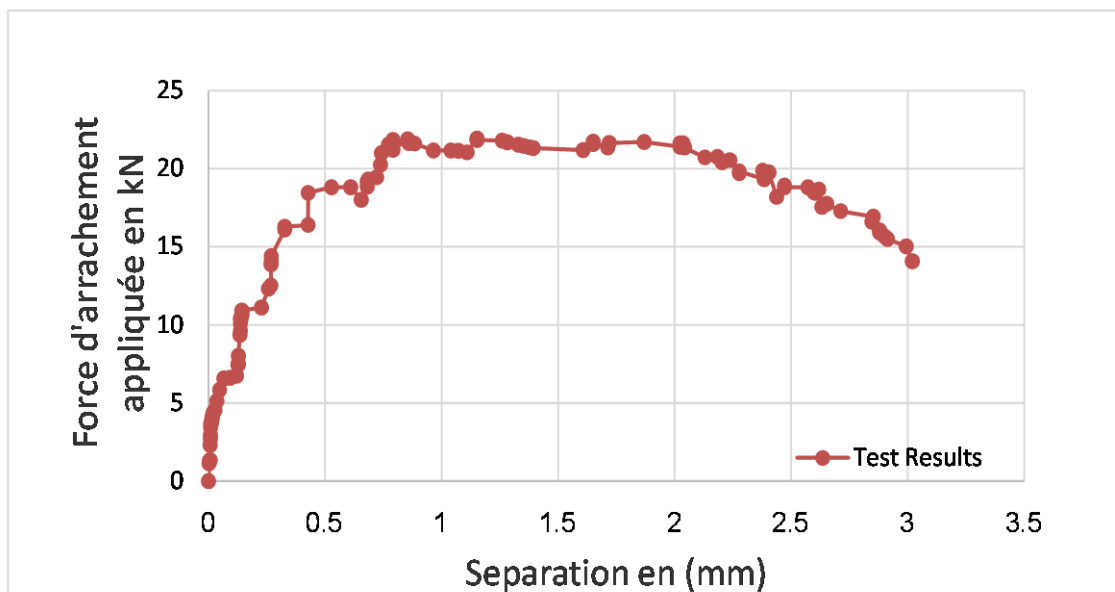
**Figure 3. 8 Fissuration et éclatement du béton**

Le mode de rupture observé pour tous les spécimens push-out est la fissuration et l'éclatement de la dalle en béton armé, ce qui démontre une grande résistance aux efforts de cisaillement des connecteurs de type IPE perforé.

D'autres travaux de recherche menés par F.Boursas [1] portent sur la résistance à l'arrachement des connecteurs en profilé en IPE perforé. Les figures ci-dessus montrent le comportement de charge-séparation des spécimens IPE6C et IPE8C sous une charge monotone. Les deux spécimens ont présenté un bon comportement ductile, avec des glissements à la rupture enregistrés à 3,52 mm et 4,58 mm respectivement pour les spécimens IPE6C et IPE8C. Les essais ont montré que les spécimens IPE6C et IPE8C ont atteint des charges maximales de 24,69 kN et 21,84 kN par connecteur respectivement.



**Figure 3. 9 Courbe charge-séparation du connecteur IPE80 avec armature de 6 mm et trou circulaire.**



**Figure 3. 10 Courbe charge-séparation du connecteur IPE80 avec armature de 8 mm et trou circulaire.**

La capacité de charge augmente d'environ 10% lorsque le diamètre de la barre de passage est augmenté de 6 mm à 8 mm dans les trous circulaires, et d'environ 22% pour les trous de coupe longue. La barre de passage joue un rôle particulier dans la résistance au soulèvement, car elle garantit les 10% recommandés par l'Eurocodes 4[9], mais elle participe également à la résistance au cisaillement de la dalle composite.



**Figure 3. 11 Fissuration et éclatement du béton**

Les deux spécimens ont échoué avec l'écrasement de la dalle de béton. Les premières fissures sur la surface des dalles de béton sont apparues autour du connecteur à une charge d'environ 10,5 kN par connecteur. La zone d'écrasement forme un cône de béton, comme illustré dans la figure 3.11.

### 1.3. Vérifications de la résistance à l'arrachement des connecteurs étudiés :

Les résultats des charges ultimes d'arrachement et de cisaillement pour les deux types de connecteurs étudiés : les goujons à tête et les IPE perforés avec une barre d'anti-soulèvement sont présentés dans le tableau 3.1

**Tableau 3. 1 La différence force de deux connecteurs**

Type de connecteurs	Résistance ultime à l'arrachement $T_U$ (kN)	Résistance ultime au cisaillement $V_U$ (kN)	Le Rapport $V_U/T_U$
Goujon à tête	112,1	197,5	56 %
IPE80 perforé	24,86	186,92	13 %

Pour les goujons à tête, la charge ultime d'arrachement est de 112,1kN, tandis que la charge ultime de cisaillement est de 197,5 kN. On peut observer que la charge ultime d'arrachement est supérieure à la charge ultime de cisaillement, ce qui indique une résistance suffisante à l'arrachement pour ce type de connecteur.

En ce qui concerne les IPE perforés avec une barre d'anti-soulèvement, la charge ultime d'arrachement est de 24,86 kN, tandis que la charge ultime de cisaillement est de 186,92 kN. Encore une fois, la charge ultime d'arrachement dépasse la charge ultime de cisaillement, ce qui suggère une résistance satisfaisante à l'arrachement pour ce type de connecteur.

Il est important de noter que les pourcentages de dépassement recommandés par l'Eurocodes 4 pour les charges ultimes d'arrachement et de cisaillement dépassent les 10 %. Cela indique que les deux types de connecteurs étudiés présentent une résistance suffisante à l'arrachement, avec une marge de sécurité confortable par rapport aux critères de conception recommandés.

En conclusion, les résultats de cette étude montrent que les goujons à tête et les IPE perforés avec une barre d'anti-soulèvement présentent tous deux une résistance adéquate à l'arrachement. Les charges ultimes d'arrachement observées dépassent les charges ultimes de cisaillement, ce qui confirme la capacité des connecteurs à résister aux forces de traction et à fournir une connexion robuste dans les structures.

#### 1.4. Comparaison des résistances à l'arrachement obtenues par rapport à la formule analytique proposée dans la littérature et les réglementations :

##### a) Goujon à tête :

Le code américain du béton ACI318 [26] fournit une équation pour calculer la résistance à l'arrachement, notée  $V_U$ , comme suit :

$$V_U = 10 \psi_{c,N} (h_{ef})^{1,5} \sqrt{f_c'}$$

Dans cette équation :

$\psi_{c,N}$  : un facteur utilisé pour ajuster la résistance à la traction de l'ancrage en fonction de la présence ou de l'absence de fissures dans le béton

$h_{ef}$  : représente la profondeur d'ancrage effective de l'ancrage.

$\sqrt{f_c'}$  : la racine carrée de la résistance spécifiée à la compression du béton.

Dans notre modèle numérique, nous avons les paramètres suivants :

La résistance spécifiée du béton est de 60 MPa.

Le facteur  $\psi_{c,N}$  est fixé à 1,25, ce qui correspond à un coulage sur place des connecteurs.

La profondeur d'ancrage effective,  $h_{ef}$ , est de 100 mm.

En substituant ces valeurs dans l'équation, nous obtenons :

$$V_U = 10 * 1,25 * (100)^{1,5} * \sqrt{60}$$

$$V_U = 96750 \text{ N}$$

Dans notre modèle, la résistance à l'arrachement,  $V_U$  est estimée à 96750 N. Cela signifie que le goujon à tête, selon les paramètres donnés, a une capacité de résistance à l'arrachement de 96750 N. Cette valeur représente la force maximale que le goujon peut supporter sans se détacher du béton. Il est important de noter que cette interprétation est basée sur les paramètres spécifiques du modèle, tels que la résistance du béton, la profondeur d'ancrage et le facteur  $\psi_{c,N}$  choisi.

Cette application de l'équation ACI318[26] nous permet donc d'évaluer la résistance à l'arrachement d'un goujon à tête spécifique dans notre modèle numérique.

##### b) IPE perforé :

Shuangje Zheng et al [3], ont proposé une équation pour calculer la résistance à l'arrachement par trou,  $T_u$ , comme suit :

$$T_u = \gamma_w * C1 * (d_p^2 - d_r^2) * f_c + C2 * d_r^2 * f_{ry} + C3 * d_p * t_p * f_{sy}$$

Dans cette équation :

$T_u$  : représente la résistance à l'arrachement par trou (N).

$d_p$  : le diamètre du trou, qui est de 12 mm dans le cas étudié.

$d_r$  : le diamètre de la barre d'armature dans le trou, qui est de 6 mm dans notre cas.

$f_c$  : la résistance à la compression du béton, évaluée à 30 MPA dans le cas étudié.

$f_{ry}$  : la limite d'élasticité de la barre d'armature, d'une valeur de 419 MPa dans le cas étudié.

$t_p$  : l'épaisseur de la nervure perforée, qui est de 3,8 mm pour IPE80.

$f_{sy}$  : la limite d'élasticité de l'acier de construction, établie à 235 MPa.

$\gamma_w$  : le facteur d'influence de l'entaille, dont la valeur est déterminée par l'équation suivante :

$$\gamma_w = 1 \text{ pour } 0 < C_w / d_p < 0,75$$

$$\gamma_w = 4(1 - C_w / d_p) \text{ pour } 0,75 < C_w / d_p < 1$$

Les coefficients d'ajustement C1, C2 et C3 sont respectivement égaux à 0,95, 0,45 et 0,18.

En utilisant ces valeurs dans l'équation, nous pouvons calculer la résistance à l'arrachement

$T_u$  comme suit :

$$T_u = 1 * 0,95 * (8^2 - 6^2) * 30 + 0,45 * 6^2 * 419 + 0,18 * 12 * 3,8 * 235$$

$$T_u = 12911,4 \text{ N}$$

Selon l'équation proposée par Shuangjie Zheng[8], la résistance à l'arrachement par trou,  $T_u$  est estimée à 12911,4 N dans notre modèle numérique. Cela indique que, compte tenu des paramètres spécifiés tels que le diamètre du trou, le diamètre de la barre d'armature, les résistances à la compression du béton et à l'élasticité de l'acier, ainsi que l'épaisseur de la nervure perforée, l'assemblage a une capacité de résistance à l'arrachement de 12911,4 N. Cette valeur représente la force maximale que du connecteur en IPE80 peut supporter sans se détacher.

### 1.5. Conclusion :

Les résultats obtenus dans ce chapitre soulignent plusieurs conclusions importantes concernant les essais de pull out avec des connecteurs de cisaillement. Premièrement, il a été observé une concentration de contrainte sous la tête du goujon, ce qui peut entraîner des déformations excessives et des ruptures locales. Cette concentration de contrainte est due à l'adhérence entre la tête du goujon et la dalle en béton, ainsi qu'à la géométrie de la tête du goujon. Il est donc essentiel de prendre en compte ces facteurs lors de la conception et de l'installation des goujons afin d'éviter les concentrations excessives de contrainte.

Deuxièmement, la réduction de la section transversale de la tige du goujon a été observée lors de l'application de charges d'arrachement élevées. Cette réduction de section limite la capacité de résistance à l'arrachement du goujon, ce qui peut compromettre la stabilité de la structure. Il est donc crucial de choisir un goujon avec une section adéquate pour résister aux charges d'arrachement prévues. En ce qui concerne les connecteurs de cisaillement en IPE perforé avec une barre d'anti-soulèvement, il a été observé une concentration de contrainte au

niveau du trou dans l'IPE perforé. Cette concentration de contrainte est due aux différences de résistance mécanique entre la barre d'anti-soulèvement et l'IPE perforé, ainsi qu'à l'épaisseur relativement mince de l'IPE. Il est donc important de prendre en compte ces caractéristiques mécaniques et géométriques lors de la conception et de l'installation de tels connecteurs afin de minimiser les concentrations de contrainte et les déformations indésirables.

Les travaux de recherche menés par Zhaofei Lin[17] ont permis de proposer une équation améliorée pour l'interaction contrainte-cisaillement des goujons à tête, ainsi que des expressions pour calculer le facteur de réduction de la rigidité au cisaillement et prédire la relation charge-glissement. Ces développements permettent de faire des prédictions plus précises de la résistance à l'interaction et du comportement charge-glissement des goujons à tête soumis à des charges combinées de cisaillement et d'arrachement.

Les travaux de recherche de F. Boursas[1] ont également fourni des informations importantes sur la résistance au cisaillement et à l'arrachement des connecteurs en profilé en IPE perforé avec une barre d'anti-soulèvement. Les résultats ont montré une résistance adéquate à l'arrachement pour les deux types de connecteurs, avec des charges ultimes d'arrachement dépassant les charges ultimes de cisaillement. Cela confirme la capacité des connecteurs à résister aux forces de traction et à fournir une connexion robuste dans les structures.



**CHAPITRE 4 :**  
**Etude paramétrique**

---

## 1. Introduction :

Ce chapitre vise à réaliser une étude paramétrique pour déterminer l'influence de certains paramètres sur la résistance à l'arrachement des deux types de connecteurs, à savoir les goujons à tête et les IPE perforés. Pour atteindre cet objectif, nous allons utiliser le logiciel Abaqus pour réaliser une analyse numérique et obtenir les courbes charge-soulèvement pour chacun des types de connecteurs étudiés. Ces courbes seront ensuite examinées, commentées et interprétées afin de comprendre les effets de chaque paramètre sur la résistance à l'arrachement. Parmi les paramètres que nous allons étudier, on peut citer la résistance du béton de la dalle, la géométrie des connecteurs, la nuance de l'acier des connecteurs, la résistance des barres d'armature...etc. Nous allons également comparer les résultats obtenus pour les deux types de connecteurs pour déterminer leur efficacité respective dans différentes conditions de charge. Grâce à cette étude paramétrique, nous espérons être en mesure de fournir des recommandations utiles pour la conception et l'utilisation de ces types de connecteurs dans différentes applications de génie civil.

## 2. Les paramètres étudiés :

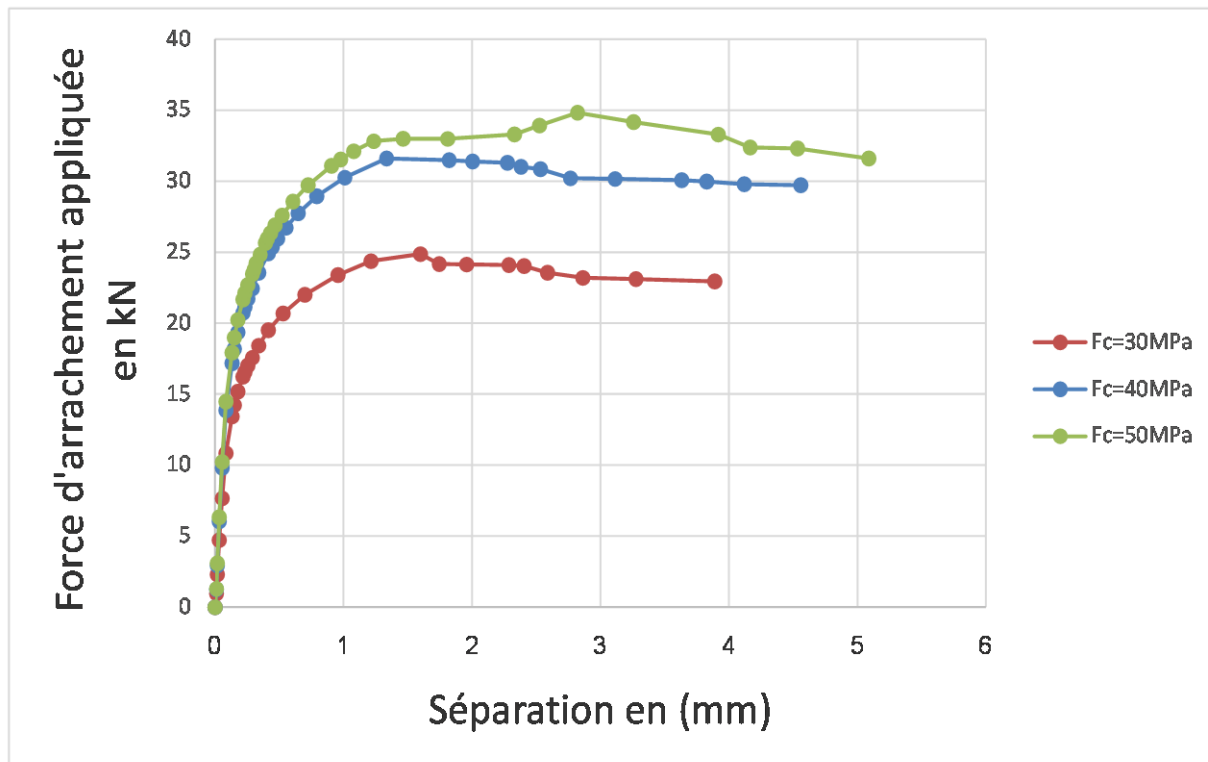
Le choix des paramètres étudiés dans cette étude paramétrique a été effectué en se basant sur des recherches antérieures[1]qui ont prouvé que ces paramètres ont une influence significative sur la résistance au cisaillement des connecteurs. Par conséquent, nous avons sélectionné les paramètres les plus pertinents pour étudier leur effet sur la résistance à l'arrachement.

Les paramètres sélectionnés pour cette étude sont les suivants : la résistance du béton, la nuance des connecteurs, la résistance des barres d'armature, le diamètre des trous de l'IPE et des armatures, le diamètre et la hauteur du goujon, ainsi que le diamètre de la tête du goujon. La résistance du béton est un paramètre important car elle affecte directement la résistance de la structure globale.[2] La nuance des connecteurs et la résistance des barres d'armature sont également des paramètres importants, car ils influencent la résistance et la capacité de transfert de charge des connecteurs.[3]Le diamètre des trous de l'IPE et des armatures, ainsi que le diamètre et la hauteur du goujon, sont également des paramètres cruciaux car ils influencent la capacité de transfert de charge et la résistance à l'arrachement des connecteurs.[4]Enfin, le diamètre de la tête du goujon est un paramètre important car il affecte la distribution des contraintes dans la tête du goujon, ce qui peut influencer la résistance à l'arrachement. En évaluant l'influence de chacun de ces paramètres sur la résistance à l'arrachement des connecteurs, nous pourrions mieux comprendre comment ces paramètres affectent la performance des connecteurs dans différentes conditions.[5]

## 2.1. IPE perforé :

### 2.1.1. Influence de la résistance du béton :

La variation de la résistance du béton a été étudiée sur le comportement à l'arrachement des connecteurs de cisaillement perforé, comme le montre la Figure 4.1.

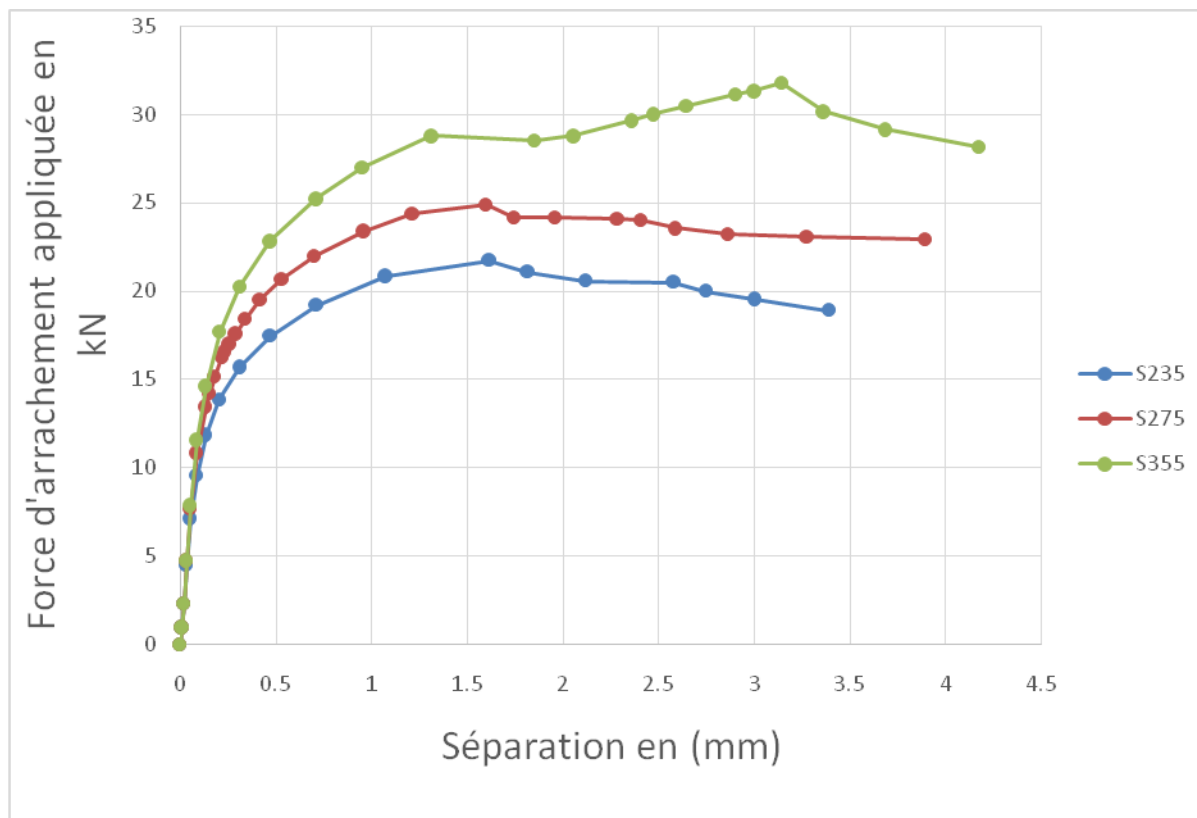


**Figure 4. 1 Influence de la résistance à la compression de béton**

Dans la figure 4.1, on peut observer l'impact de la résistance du béton sur le comportement des connecteurs de cisaillement perforé sous chargement de traction. Une augmentation de la résistance du béton de 30 MPa à 40 MPa, 50 MPa, a provoqué une augmentation respective de la résistance à l'arrachement de 21%, et 28%. Cette étude démontre que l'augmentation de la résistance du béton conduit à une forte amélioration de la résistance à l'arrachement des connecteurs en IPE perforés. Cette amélioration peut être attribuée à la réduction de la zone endommagée du béton au moment de la rupture par arrachement. Par conséquent, l'utilisation d'un béton de résistance plus élevée peut améliorer la résistance à l'arrachement du connecteur de cisaillement perforé. Cependant, lorsque la résistance du béton dépasse 40 MPa, la résistance à l'arrachement tend à ne plus augmenter. Cela est peut-être dû au fait que des barres d'armature sont nécessaires pour correspondre à la résistance du béton plus élevé afin d'obtenir une résistance totale en béton.

➤ **L'influence de la nuance d'acier du connecteur en IPE80 Perforé :**

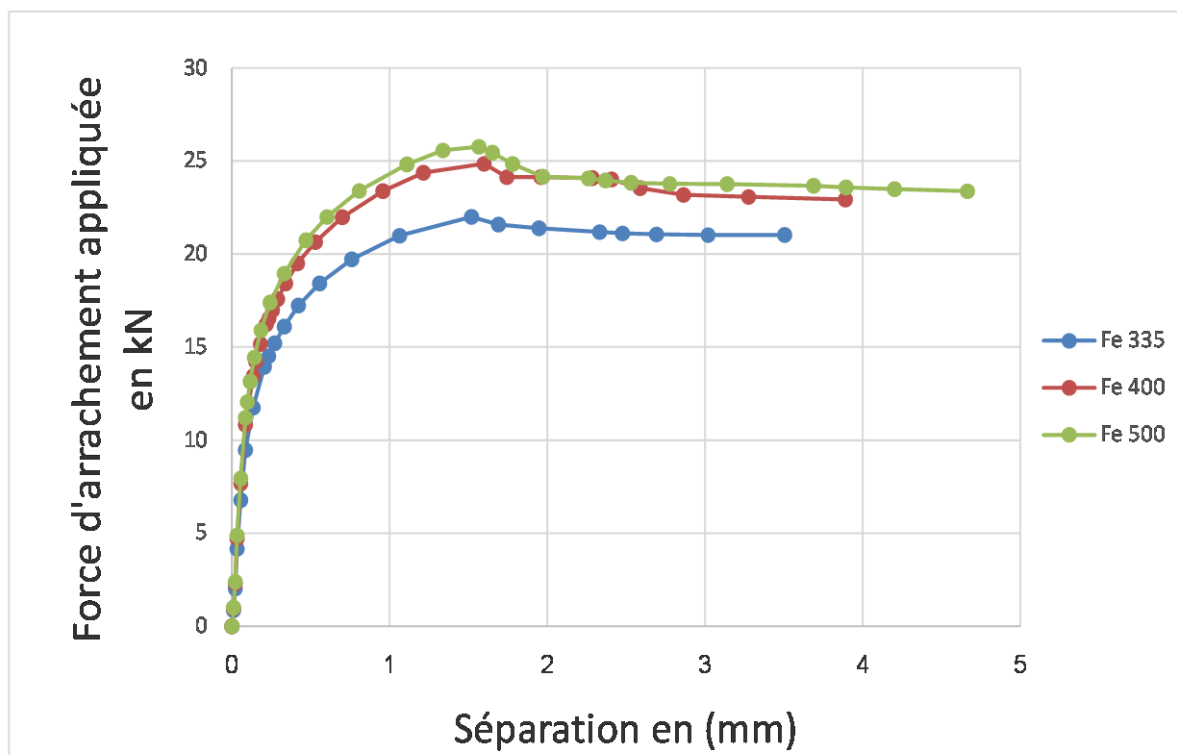
Selon la Figure 4.2, la nuance d'acier du connecteur en IPE80 Perforé a un impact important sur le comportement à l'arrachement. Lorsque la force d'arrachement du connecteur perforé est en acier S235, la résistance à l'arrachement est de 21.71 kN, cependant les connecteurs en acier S275 et S355 ont respectivement supporté une force d'arrachement de 25KN et 32KN, montrant une résistance plus élevée par rapport aux connecteurs perforé en acier S235.



**Figure 4. 2 Influence de la nuance d'IPE80**

Les résultats ont indiqué que l'augmentation de la nuance du connecteur perforé a conduit à une augmentation de la résistance à l'arrachement du connecteur de cisaillement IPE80 perforé. Par conséquent, en utilisant une nuance plus élevée, la résistance à l'arrachement du connecteur de cisaillement perforé cranté pourrait être améliorée.

➤ **L'influence de la résistance des barres d'armature :**

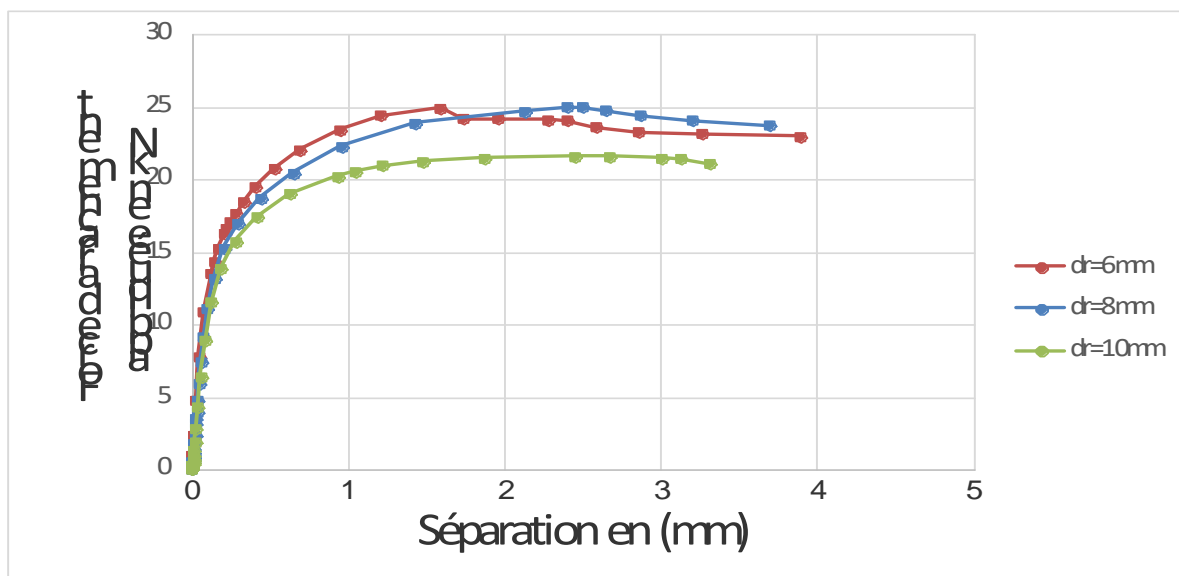


**Figure 4. 3 Influence de la résistance des armatures**

Lorsque la limite d'élasticité de la barre d'armature était augmentée de 335 MPa à 400 MPa et à 500 MPa, la résistance à l'arrachement du connecteur en IPE80 perforé augmentait respectivement de 14 % et 15 %. Ces résultats suggèrent que l'augmentation de la résistance de l'armature conduit à une amélioration de la résistance à l'arrachement du connecteur de cisaillement perforé. Une explication possible de cette observation est que l'utilisation d'une barre d'armature plus résistante dans le trou augmente les effets combinés de la barre d'armature et du béton dans le trou. Cependant, les résultats ont également montré que lorsque la limite d'élasticité de la barre d'armature était supérieure à 400 MPa, la résistance à l'arrachement avait tendance à ne plus augmenter. Cette observation peut être due au fait que l'utilisation d'un béton plus résistant est nécessaire pour atteindre la pleine résistance de l'armature perforante dans le trou, ce qui est en corrélation avec la barre d'armature à haute résistance. Enfin, ces résultats soulignent l'importance de la résistance de l'armature pour améliorer la résistance à l'arrachement des connecteurs de cisaillement perforé, et que la combinaison optimale entre la résistance de l'armature et la résistance du béton doit être recherchée pour obtenir une résistance à l'arrachement maximale.

- **L'influence du diamètre des trous et de la barre d'armatures passant par le trou :**

L'influence du diamètre du trou et du diamètre de la barre d'armatures passant par le trou sur le comportement à l'arrachement des connecteurs de cisaillement perforé est illustrée à la figure 4.4.



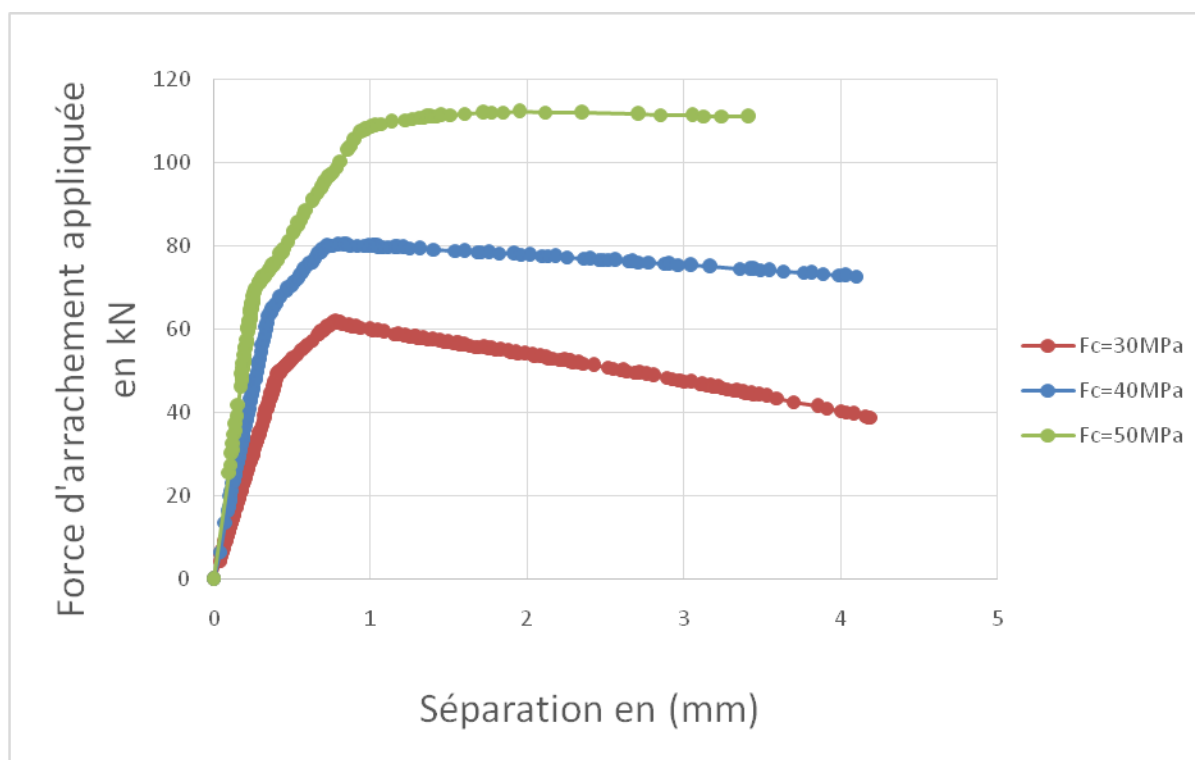
**Figure 4. 4 Influence du diamètre des trous et de la barre d'armatures passant par le trou**

Une augmentation de diamètre des trous et de la barre d'armatures passant par le trou de 6 mm à 8 mm, 10 mm, a entraîné une diminution respective de 2 % et 12 % de la résistance à l'arrachement du connecteur de cisaillement en IPE80 perforé. Les résultats ont montré que l'augmentation du diamètre du trou de 6 mm à 10 mm avait un effet négatif sur la résistance à l'arrachement du connecteur. La raison principale est que le mode de rupture dépend du cisaillement en béton dans le trou, dont la résistance diminue avec l'augmentation du diamètre du trou. Toutefois, même avec un diamètre de trou de 8 mm, la diminution de la résistance à l'arrachement tend à être plus faible. Cette tendance pourrait s'expliquer par une diminution de l'effet de retenue de l'armature de perforation sur le béton dans le trou.

### 3.1.Goujon à tête :

- **L'influence de la résistance du béton :**

Une variation de la résistance du béton de la dalle est réalisée dans cette partie et on a tracé les courbes de force-séparation pour décrire l'effet de la résistance de béton  $F_C$  comme le montre la figure 4.5.



**Figure 4. 5 Influence de la résistance à la compression du béton**

Les résultats ont montré que la résistance du connecteur augmente proportionnellement avec l'amélioration de la résistance du béton à la compression. En outre, après avoir simulé l'essai de "Pull-Out" avec différentes résistances de béton 30MPa, 40 MPa et 50 MPa, la résistance à l'arrachement était de 61 kN, 80 kN et 112 kN respectivement, ce qui signifie que l'utilisation d'un béton de haute résistance peut améliorer la résistance globale de la connexion vis-à-vis résistance à l'arrachement. Cela indique que la connexion peut subir des déformations importantes avant de se rompre, ce qui peut améliorer la sécurité de la structure en cas de charges importantes ou de séismes.

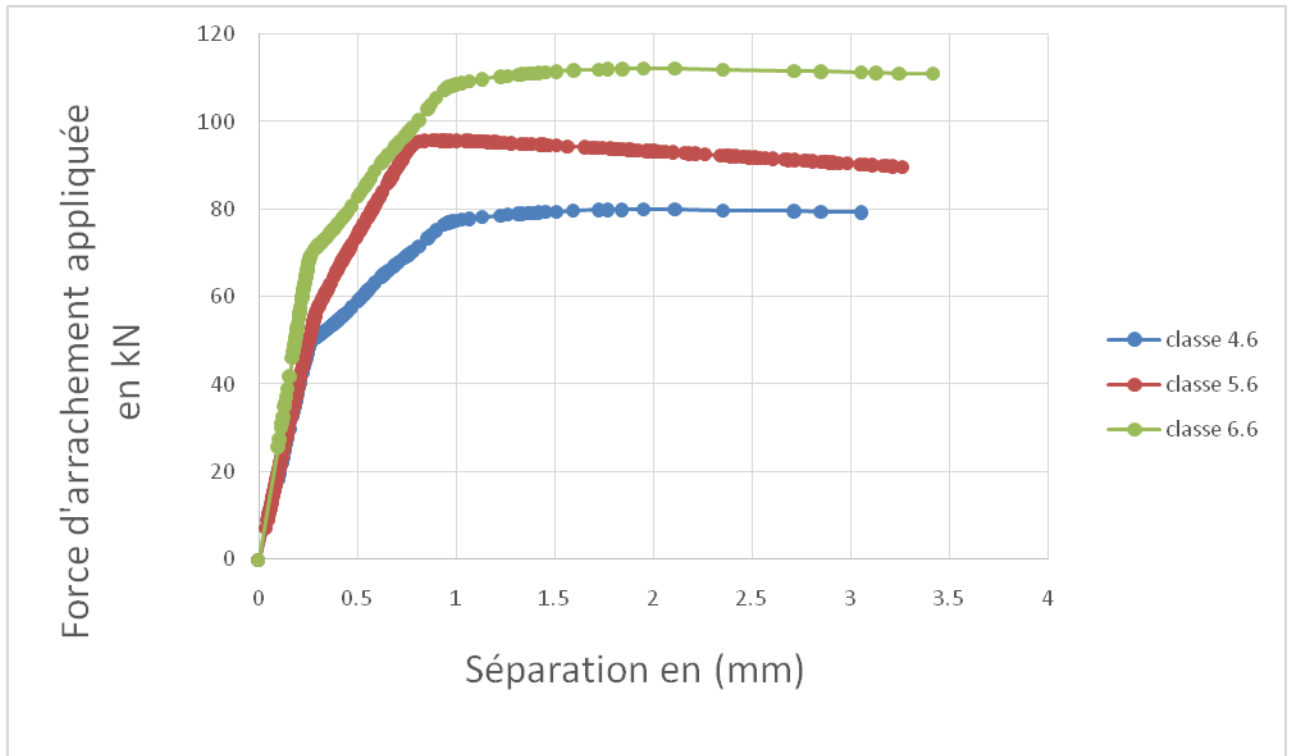
➤ **L'influence de la classe du goujon à tête :**

Les résultats obtenus en variant la classe des goujons révèlent que les forces d'arrachement maximales ( $F1 = 80\text{KN}$ ,  $F2 = 90\text{KN}$ ,  $F3 = 115\text{KN}$ ) sont atteintes, correspondant respectivement aux classes de goujon ( $C1 = 4.6$ ,  $C2 = 5.6$ ,  $C3 = 6.6$ ). Au-delà de ces valeurs de charge, les courbes continuent de croître jusqu'à ce que le connecteur atteigne son point de plastification. Pour la courbe (1), la force maximale observée est  $F1 = 80\text{KN}$ , au-delà de laquelle la charge continue d'augmenter jusqu'à la rupture du connecteur avec un déplacement de 3mm.

En conclusion, il a été remarqué que l'augmentation de la classe du connecteur entraîne également une augmentation de la résistance au cisaillement. Cela suggère que l'utilisation de

connecteurs de classe supérieure peut améliorer la résistance de la connexion et sa capacité à résister aux forces d'arrachement.

Ces résultats revêtent une grande importance dans la conception et l'évaluation des connexions structurelles, car ils soulignent que le choix de la classe du connecteur peut avoir un impact significatif sur la résistance et les performances de la connexion dans des conditions de charge élevée.

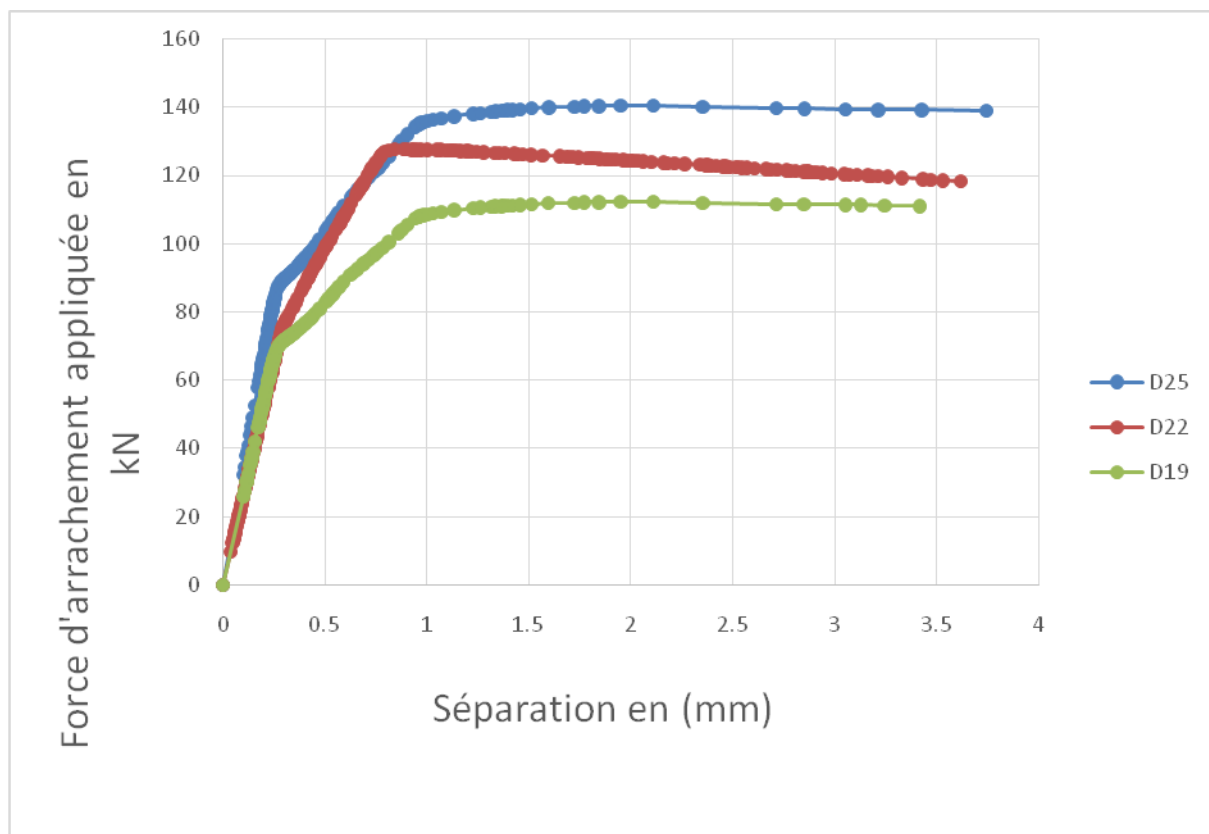


**Figure 4. 6 Influence de classe du goujon**

➤ **L'influence du diamètre du goujon :**

Une variation du diamètre du goujon en fonction de la charge d'arrachement est représentée dans la figure 4.7.





**Figure 4. 7 Influence du diamètre du goujon**

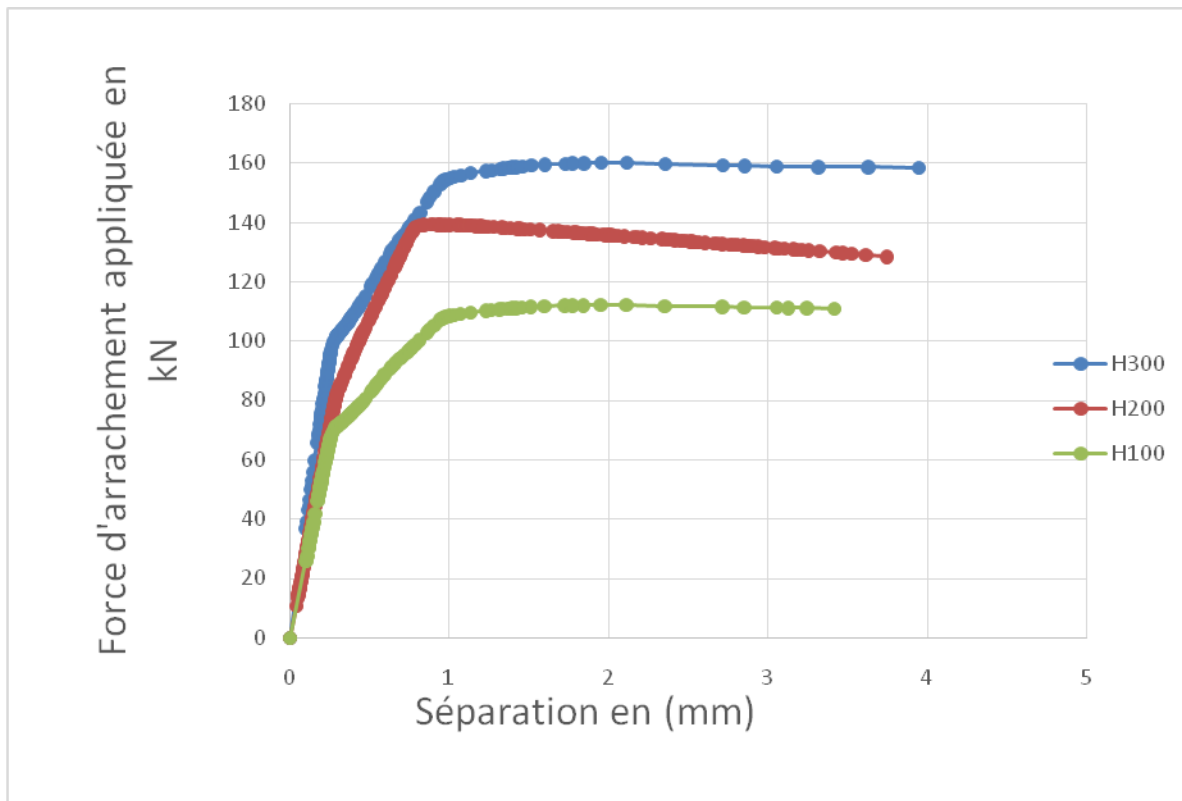
Les résultats montrent que les courbes correspondant aux diamètres de goujon de 19 mm, 22 mm et 25 mm présentent des séparations maximales de 3,4 mm, 3,6 mm et 3,7 mm respectivement. Les résistances ultimes à l'arrachement sont de 0,4 kN, 3,6 kN et 3,7 kN respectivement. Ces observations indiquent un comportement élasto-plastique et une grande rigidité. Au-delà de la charge ultime, la séparation continue d'augmenter jusqu'à la rupture pour tous les diamètres de goujon testés. Cela suggère que, même après avoir atteint la résistance ultime, les connexions continuent de subir une déformation et une séparation supplémentaires jusqu'à ce qu'elles finissent par se rompre.

Ces résultats mettent en évidence la relation entre le diamètre du goujon, la séparation et la résistance à l'arrachement. Un diamètre de goujon plus grand entraîne généralement une séparation maximale plus élevée et une résistance ultime plus élevée. Cela peut être dû à une meilleure distribution des charges et à une plus grande capacité de retenue du goujon dans la poutre en acier et la dalle de béton.

➤ **Influence de la hauteur du goujon :**

La figure 4.8 présente l'effet de la hauteur du goujon sur le comportement et la résistance à l'arrachement de ce type de connecteur. Les hauteurs du goujon utilisées étaient de 100 mm,

200 mm et 300 mm, avec des forces ultimes d'arrachement respectives de 115 kN, 140 kN et 160 kN. Les résultats démontrent que l'augmentation de la hauteur du goujon a un impact significatif sur la résistance à l'arrachement de ce connecteur par cisaillement. En d'autres termes, plus la hauteur du goujon est élevée, plus la force d'arrachement est élevée.



**Figure 4. 8 Influence de la hauteur**

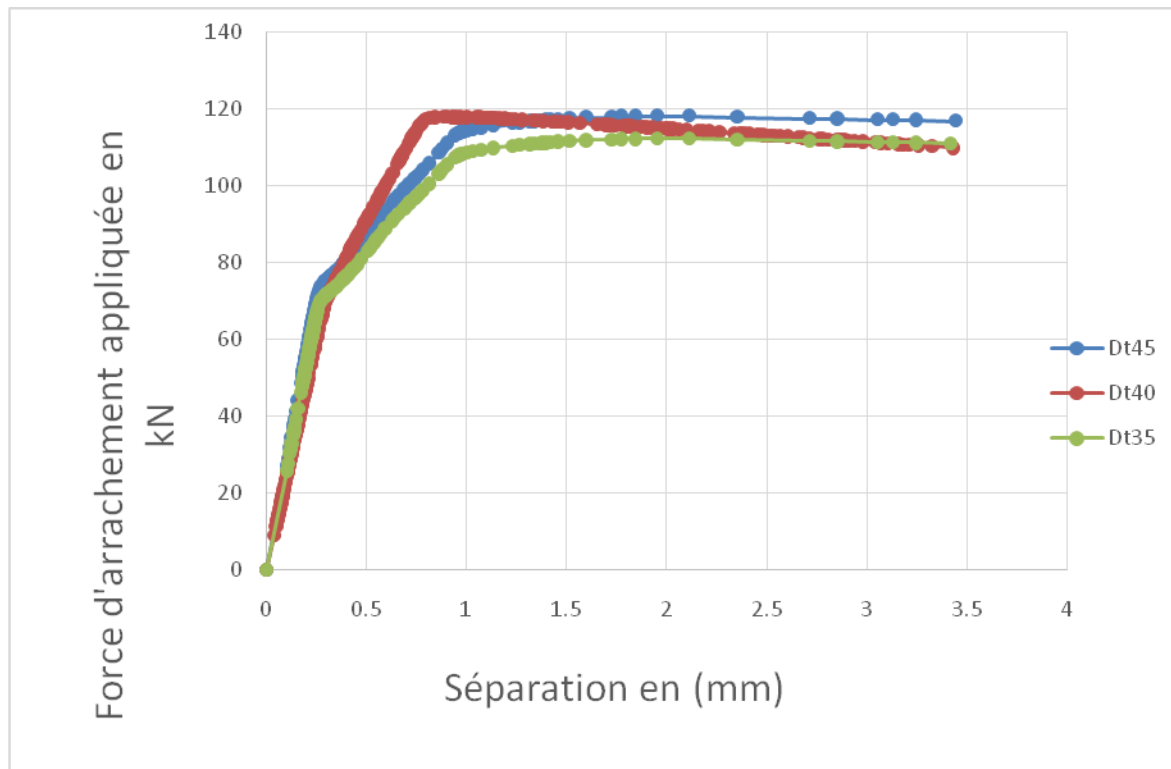
Ces résultats sont en accord avec les attentes, car une hauteur accrue du goujon permet une meilleure répartition des charges et une plus grande capacité de retenue entre la poutre en acier et la dalle de béton. Cela se traduit par une augmentation de la résistance de la connexion à l'arrachement.

Ces observations sont d'une grande importance pour la conception et l'évaluation des connexions par cisaillement. Elles soulignent l'importance de choisir une hauteur de goujon appropriée afin de garantir une résistance adéquate à l'arrachement et d'assurer la stabilité de la connexion, en particulier dans des conditions de charge élevée. Ces résultats fournissent des indications précieuses pour l'optimisation des connexions par cisaillement, en permettant aux ingénieurs de sélectionner la hauteur de goujon la plus appropriée pour répondre aux exigences de résistance et de performance de la connexion.

➤ **Influence du diamètre de la tête du goujon :**

Le comportement à l'arrachement n'est guère affecté par le diamètre de la tête du goujon. Lorsque les diamètres du goujon ont été modifiés de 35 mm à 40 mm et 45 mm, la force

d'arrachement du connecteur de cisaillement n'a pas dépassé 120 KN. Cette constatation suggère que la forme et les dimensions de la tête du goujon ne jouent pas un rôle déterminant dans la résistance à l'arrachement du connecteur de cisaillement. Cependant, un diamètre minimal est nécessaire pour assurer une résistance acceptable. Ainsi, il est crucial d'assurer une conception et une fabrication appropriées de la tête du goujon afin de garantir la résistance et les performances de la connexion, surtout dans des conditions de charge élevée.



**Figure 4. 9 influence du diamètre de tête du goujon**

### 3. Conclusion :

Ce chapitre a présenté une étude paramétrique visant à évaluer l'influence de certains paramètres sur la résistance à l'arrachement de deux types de connecteurs, à savoir les goujons à tête et les IPE perforés. Vingt-sept modèles à base d'éléments finis non linéaires ont été développés. Les paramètres étudiés comprennent la résistance du béton, la nuance des connecteurs, la résistance des barres d'armature, le diamètre des trous de l'IPE et des armatures, le diamètre et la hauteur du goujon, ainsi que le diamètre de la tête du goujon.

Pour les connecteurs IPE perforés, les résultats ont montré que l'augmentation de la résistance du béton a conduit à une amélioration de la résistance à l'arrachement. De même, l'utilisation d'une nuance d'acier plus élevée pour les connecteurs a également amélioré leur résistance à l'arrachement. L'augmentation de la résistance des barres d'armature a également conduit à une amélioration de la résistance à l'arrachement des connecteurs perforés. De plus,

---

l'augmentation du diamètre des trous et des barres d'armature passant par le trou a augmenté la résistance à l'arrachement des connecteurs perforés.

Pour les goujons à tête, l'augmentation de la résistance du béton a également amélioré la résistance à l'arrachement. De plus, l'augmentation de la classe du goujon a conduit à une augmentation de la résistance au cisaillement. De même, l'augmentation du diamètre du goujon a augmenté la résistance à l'arrachement, tout comme l'augmentation de la hauteur du goujon.

En conclusion, cette étude paramétrique a permis de mieux comprendre l'influence de chaque paramètre sur la résistance à l'arrachement des connecteurs. Les résultats fournissent des recommandations utiles pour la conception et l'utilisation de ces types de connecteurs dans différentes applications de génie civil, en mettant en évidence l'importance de la résistance du béton, de la nuance des connecteurs, de la résistance des barres d'armature, du diamètre des trous et des barres d'armature, ainsi que du diamètre et de la hauteur du goujon. Ces informations peuvent aider les ingénieurs à optimiser la conception des connexions structurelles et à améliorer leur performance en termes de résistance à l'arrachement.

### Conclusion Générale

Cette étude a examiné les comportements des poutres mixtes et l'importance des connecteurs de cisaillement dans ces structures, mettant en évidence la nécessité de sélectionner des connecteurs appropriés en fonction des exigences spécifiques de la structure. Les résultats de recherche sur la résistance à l'arrachement des connecteurs de cisaillement ont fourni des informations précieuses sur ce paramètre crucial dans les poutres mixtes acier-béton.

L'utilisation de la modélisation par la méthode des éléments finis a permis de développer un modèle numérique non linéaire reproduisant le comportement observé lors des essais. Cette technique s'est révélée efficace pour mener des études paramétriques et explorer différentes conditions expérimentales, ce qui peut guider la conception de futurs essais de pull-out. Les résultats ont souligné plusieurs conclusions importantes, notamment la concentration de contrainte sous la tête du goujon, ce qui nécessite une attention particulière à l'adhérence entre la tête du goujon et la dalle en béton, ainsi qu'à la géométrie de la tête du goujon lors de la conception et de l'installation des connecteurs. De plus, la réduction de la section transversale de la tige du goujon sous des charges d'arrachement élevées limite sa capacité de résistance à l'arrachement et peut compromettre la stabilité de la structure.

Dans le cas des connecteurs de cisaillement en IPE perforé avec une barre d'anti-soulèvement, une concentration de contrainte au niveau du trou dans l'IPE perforé a été observée. Pour minimiser les concentrations de contrainte et les déformations indésirables, il est essentiel de prendre en compte les différences de résistance mécanique entre la barre d'anti-soulèvement et l'IPE perforé, ainsi que l'épaisseur relativement mince de l'IPE lors de la conception et de l'installation de ces connecteurs.

En outre, une étude paramétrique a permis d'évaluer l'influence de divers paramètres sur la résistance à l'arrachement des connecteurs. Pour les connecteurs IPE perforés, les résultats ont démontré que l'augmentation de la résistance du béton améliorerait la résistance à l'arrachement. De même, l'utilisation d'une nuance d'acier plus élevée pour les connecteurs conduisait également à une meilleure résistance à l'arrachement. Une augmentation de la résistance des barres d'armature se traduisait également par une amélioration de la résistance à l'arrachement des connecteurs perforés. De plus, un accroissement du diamètre des trous et des barres d'armature passant par le trou augmentait la résistance à l'arrachement des connecteurs perforés.

Pour ce qui est des goujons à tête, une augmentation de la résistance du béton améliorerait également leur résistance à l'arrachement. De plus, une augmentation de la classe des goujons conduisait à une résistance au cisaillement accrue. De même, un plus grand diamètre de

goujon augmentait la résistance à l'arrachement, tout comme une augmentation de la hauteur du goujon. Ces résultats ont fourni des recommandations utiles pour la conception et l'utilisation de ces types de connecteurs, soulignant l'importance de chaque paramètre dans la résistance à l'arrachement

**Perspectives :**

Dans les perspectives futures, il est recommandé de poursuivre les recherches en vérifiant davantage de connecteurs de cisaillement pour s'aligner sur les recommandations de l'Eurocodes 4. Il serait également intéressant d'étudier les connecteurs de cisaillement sous des chargements cycliques d'arrachement et de mener des études approfondies sur les connecteurs soumis à des chargements combinés de traction et de cisaillement. Ces efforts permettront de renforcer notre compréhension et d'optimiser la conception des connexions structurelles dans les poutres mixtes et d'améliorer leur performance dans diverses applications de génie civil.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- [1] BOURSAS FARID U. Larbi, “Doctorat En-Sciences Analyse du comportement de la connexion dans les poutres composites acier-béton : Modélisation numérique et étude paramétrique,” 2022.
- [2] S. H. Kim, K. S. Kim, D. H. Lee, J. S. Park, and O. Han, “Analysis of the shear behavior of stubby Y-type perfobond rib shear connectors for a composite frame structure,” *Materials (Basel)*, vol. 10, no. 11, 2017, doi: 10.3390/ma10111340.
- [3] M. Boudiaf, G. Civil, C. Specialite, and M. Titoum, “Évaluation de la résistance et la ductilité des connecteurs en « I »,” 2016.
- [4] M. Gascon, “DANS DU BÉTON FIBRÉ À ULTRA-HAUTES PERFORMANCES POUR LA,” 2016.
- [5] A. Koaik, I. Alachek, N. Reboul, S. Bel, and B. Jurkiewicz, “Caractérisation du collage béton-béton par essais push- out,” vol. 34, no. 1, pp. 126–133.
- [6] Z. I. Soutenu, B. Encadrant, M. A. Examineurs, and S. Esma, “Mémoire,” *Etude la Connex. dans les poutres Mix. des bâtiments métalliques*.
- [7] B. Loubna, “Contribution à l’étude expérimentale et théorique de structures mixtes acier-béton assemblées par collage,” p. 197, 2005.
- [8] B. Maghaghi, M. Titoum, and A. Mazoz, “Experimental evaluation of new channel shear connector shapes,” *Int. J. Steel Struct.*, vol. 21, no. 3, pp. 883–900, 2021, doi: 10.1007/s13296-021-00478-x.
- [9] C. I. Acier, “EUROCODE 4 EN 1994 au calcul des structures mixtes acier-béton,” 1994.
- [10] X. Xu, S. Zeng, W. He, Z. Hou, D. He, and T. Yang, “Numerical Study on the Tensile Performance of Headed Stud Shear Connectors with Head-Sectional Damage,” *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 8, 2022, doi: 10.3390/ma15082802.
- [11] R. M. Lawson, J. B. P. Lim, and S. O. Popo-Ola, “Pull-out forces in shear connectors in composite beams with large web openings,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 87, pp. 48–59, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2013.03.025.
- [12] B. Scholars, B. O. Access, and C. Commons, “University of Bradford eThesis”.
- [13] B. F, “No Title”.
- [14] “Mécanique des sols : L ’ ESSAI DE CISAILLEMENT Mécanique des sols : L ’ ESSAI DE CISAILLEMENT”.
- [15] L. F. Costa-Neves, J. P. Figueiredo, P. C. G. d. S. Vellasco, and J. da C. Vianna, “Perforated shear connectors on composite girders under monotonic loading: An experimental approach,” *Eng. Struct.*, vol. 56, pp. 721–737, 2013, doi:

- 10.1016/j.engstruct.2013.06.004.
- [16] L. Pallarés and J. F. Hajjar, “Headed steel stud anchors in composite structures, Part I: Shear,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 66, no. 2, pp. 198–212, 2010, doi: 10.1016/j.jcsr.2009.08.009.
- [17] Z. Lin, Y. Liu, and J. He, “Behavior of stud connectors under combined shear and tension loads,” *Eng. Struct.*, vol. 81, pp. 362–376, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.10.016.
- [18] S. Zheng, Y. Liu, T. Yoda, and W. Lin, “Parametric study on shear capacity of circular-hole and long-hole perfobond shear connector,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 117, pp. 64–80, 2016, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.09.012.
- [19] Y. H. Kim, J. Y. Kang, H. B. Koo, and D. J. Kim, “Pull-Out Resistance Capacity of a New Perfobond Shear Connector for Steel Pile Cap Strengthening,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/1374689.
- [20] S. Zheng, Y. Liu, Y. Liu, and C. Zhao, “Experimental and parametric study on the pull-out resistance of a notched perfobond shear connector,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 4, 2019, doi: 10.3390/app9040764.
- [21] B. Maghaghi, M. Titoum, and A. Mazoz, “Experimental evaluation of new channel shear connector shapes,” *Int. J. Steel Struct.*, no. 0123456789, 2021, doi: 10.1007/s13296-021-00478-x.
- [22] E. L. Tan, H. Varsani, and F. Liao, “Experimental study on demountable steel-concrete connectors subjected to combined shear and tension,” *Eng. Struct.*, vol. 183, no. December 2018, pp. 110–123, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.12.088.
- [23] O. G. L. Almeida, O. M. L. Almeida, L. R. A. Costa, K. K. F. Nunes, J. F. Hidelbrando, and M. M. C. Araújo, “Numerical Simulation Of Pull Out Tests In Steel Checkered Plates,” *Proc. XLI Ibero-Latin-American Congr. Comput. Methods Eng.*, no. November, 2020.
- [24] “Hillerborg 1985 Base théorique d’une méthode de détermination de l’énergie de rupture G F du béton.”
- [25] L. T. Christensen and J. Cornelissen, “Bridging Corporate and Organizational Communication: Review , Development and a Look to the Future,” 2013, doi: 10.1007/978-3-531-18961-1.
- [26] A. Committee and A. C. Institute, *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary*, vol. 2007. 2008. [Online]. Available: [https://books.google.co.uk/books?hl=en&lr=&id=c6yQszMV2-EC&oi=fnd&pg=PT10&dq=concrete&ots=nWUrH\\_-zNL&sig=UshlYyVQSHxVDcaAdLIMw-9gylQ](https://books.google.co.uk/books?hl=en&lr=&id=c6yQszMV2-EC&oi=fnd&pg=PT10&dq=concrete&ots=nWUrH_-zNL&sig=UshlYyVQSHxVDcaAdLIMw-9gylQ)



- [27] X. Wang, Y. Liu, and Y. Liu, “Experimental study on shear behavior of notched long-hole perfobond connectors,” *Adv. Struct. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 202–213, 2019, doi: 10.1177/1369433218782991.
- [28] S. Zheng, Y. Liu, Y. Liu, and C. Zhao, “Experimental and parametric study on the pull-out resistance of a notched perfobond shear connector,” *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 4, 2019, doi: 10.3390/app9040764.
- [29] R. M. Lawson, J. B. P. Lim, and S. O. Popo-Ola, “Pull-out forces in shear connectors in composite beams with large web openings,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 87, pp. 48–59, 2013, doi: 10.1016/j.jcsr.2013.03.025.
- [30] U. Larbi, “Doctorat En-Sciences Analyse du comportement de la connexion dans les poutres composites acier-béton : Modélisation numérique et étude paramétrique,” 2022.
- [31] J. da C. Vianna, L. F. Costa-Neves, P. C. G. da, and S. A. L. de Andrade, “Experimental assessment of Perfobond and T-Perfobond shear connectors’ structural response,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 65, no. 2, pp. 408–421, 2009, doi: 10.1016/j.jcsr.2008.02.011