

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 عبد القادر باخليل

1. Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En: Génie civil

Spécialité: Structures

Par:

BENAMEUR IBRAHIM

BENAMAR ABDEL DJABBAR

Sujet

Etude Numérique du comportement des systèmes hybrides Poutre en BA et Poteau en Acier (Clés de Cisaillement)

Soutenu publiquement, le /06/2025,

devant le jury composé de :

M. MISSOUM ABDELGHANI

Prof.

Université de Tlemcen

Président

Mme. BENKELFAT Naoual

MCA

Université de Tlemcen

Examinatrice

M. BELBACHIR AHMED

DR

Université de Tlemcen

Encadrant

Mme. NASSIMA AISSAOUI

DR

Université de Tlemcen

Co-Encadrant

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, Nous exprimons notre gratitude envers Dieu Tout-Puissant pour nous avoir octroyé la force, le courage et la détermination nécessaires pour accomplir cette tâche.

Nous profitons de l'occasion pour adresser nos plus sincères remerciements à Monsieur **BELBACHIR AHMED** et madame **NASSIMA AISSAOUI** doctorants à l'université de Tlemcen, pour avoir gracieusement partagé avec nous leur passion pour la recherche scientifique. Nous remercions leur accueil chaleureux, leur disponibilité constante, leur exigence élevée, leurs conseils inestimables et leur motivation. Nous tenons à leur exprimer toute notre gratitude pour leur aide précieuse.

Nous adressons nos sincères remerciements au Monsieur **BELBACHIR AHMED** encore une fois et président de jury **Pr. MISSOUM ABDELGHANI** ainsi qu'au **Dr .BENKELFAT NAOUAL** d'avoir accepté de lire et d'examiner ce travail et d'apporter les critiques nécessaires à la perfection de ce travail.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à tous les enseignants du département de **Génie Civil** qui ont contribué à notre formation.

Nos vifs remerciements vont également à tous nos amis avec qui nous avons partagé des moments inoubliables pendant nos études.

RESUME

Ce mémoire s'intéresse à l'étude numérique du comportement des structures hybrides combinant des poutres en béton armé (BA) et des poteaux en acier, une solution de plus en plus utilisée dans le domaine de la construction moderne en raison de ses avantages en termes de performance structurale, d'optimisation des matériaux et de rapidité d'exécution. L'objectif principal de ce travail est d'analyser l'interaction entre les éléments en béton et en acier, notamment au niveau de la zone d'interface, où des dispositifs appelés clés de cisaillement sont utilisés pour assurer une bonne transmission des efforts. L'efficacité de ces clés est déterminante pour garantir la solidarité entre les éléments hétérogènes et le bon fonctionnement global du système. Les résultats ont permis d'identifier les zones critiques au sein de la structure et de mieux comprendre le rôle des clés de cisaillement dans le transfert des efforts pour garantir un comportement structurel fiable et performant. Elle ouvre également la voie à de futures recherches, notamment expérimentales, pour affiner les modèles et proposer des recommandations pratiques aux ingénieurs.

Mots-clés : Structure hybride, Béton armé, Poteau en acier, Clés de cisaillement, Modélisation numérique.

ABSTRACT

This thesis focuses on the numerical study of the behavior of hybrid structures combining reinforced concrete (RC) beams and steel columns, a solution increasingly used in modern construction due to its advantages in terms of structural performance, material optimization and speed of execution. The main objective of this work is to analyze the interaction between concrete and steel elements, particularly at the interface zone, where devices called shear keys are used to ensure proper transmission of forces. The effectiveness of these shear keys is decisive in guaranteeing solidarity between heterogeneous elements and the proper overall functioning of the system. The results have enabled us to identify critical zones within the structure, and to gain a better understanding of the role of shear keys in the transfer of forces to guarantee reliable, high-performance structural behavior. It also paves the way for future research, particularly experimental, to refine the models and provide engineers with practical recommendations

Keywords: Hybrid structure, Reinforced concrete, Steel column, Shear keys, Numerical modeling

المخلص :

يتناول هذا البحث دراسة عددية لسلوك الهياكل المختلطة التي تجمع بين الكمرات (العوارض) المصنوعة من الخرسانة المسلحة والأعمدة المصنوعة من الفولاذ، وهو نظام إنشائي يُستخدم بشكل متزايد في مجال البناء الحديث، نظراً لما يقدمه من مزايا من حيث الأداء الهيكلي، وترشيد استخدام المواد، وسرعة التنفيذ. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تحليل التفاعل بين العناصر الخرسانية والفولاذية، لا سيما عند منطقة الاتصال، حيث تُستخدم مفاتيح القص (clés de cisaillement) لضمان انتقال جيد للقوى بين المادتين. وتُعد فعالية هذه المفاتيح عاملاً حاسماً لضمان الترابط والتكامل الإنشائي بين العناصر المختلفة، وضمان الأداء العام الجيد للنظام. وقد أظهرت النتائج إمكانية تحديد المناطق الحرجة داخل الهيكل، كما ساعدت على فهم أفضل لدور مفاتيح القص في نقل القوى. كما تم إجراء مقارنات مع نتائج واردة في الأدبيات، وخاصة أعمال Vincent Crozet، بهدف التحقق من صحة النماذج العددية المستخدمة. وفي الختام، تبرز هذه الدراسة أهمية التصميم الجيد لمفاتيح القص في الأنظمة المختلطة، لما له من دور في ضمان سلوك إنشائي موثوق وفعال. كما تمهد هذه الدراسة الطريق لأبحاث مستقبلية، لا سيما التجريبية منها، بهدف تحسين النماذج وتقديم توصيات عملية للمهندسين.

الكلمات الرئيسية : هيكل هجين، خرسانة مسلحة، عمود فولاذي، مفاتيح القص، النمذجة العددية

TABLE DES MATIERES

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I :	3
1 Introduction :.....	3
2 Type de rupture :	5
2.1 Rupture par flexion :	5
2.2 Rupture par cisaillement :	6
2.3 Décollement et délamination :	6
2.4 Rupture par interaction flexion-cisaillement :	7
2.5 Facteurs influençant les mécanismes :	7
2.6 Réduction de la capacité portante :	8
2.7 Modification des modes de rupture :	8
2.8 Augmentation des déformations et fissurations :	8
2.9 Impact sur la durabilité :.....	9
2.10 Solutions d'atténuation :	9

3	Renforts composites en PRF (Polymères Renforcés de Fibres) :.....	10
	3.1 Configurations clés :.....	10
	3.2 Avantage :.....	10
	3.3 Fibres métalliques intégrées au béton :	10
	3.4 Systèmes d'ancrage avancés :	10
	3.5 Combinaisons hybrides :	11
	3.6 Performances comparées :	11
	3.7 Facteurs critiques de succès :	11
4	Avantage des tissus hybrides :.....	12
	4.1 Avantage des tissus hybrides bidirectionnels :.....	12
	4.2 Exemples d'applications :.....	12
5	Assemblage des poutres hybrides :.....	13
	5.1 Assemblages mécaniques :	13
	5.2 Assemblages par collage ou adhésion :.....	13
	5.3 Assemblages par boulonnage ou rivetage :.....	13
	5.4 Assemblages par soudage :.....	13
	5.5 Exemples d'applications efficaces :.....	14
	5.6 Comportement mécanique :.....	14
	5.7 Résistance au feu :.....	14
	5.8 Assemblage et connexion :.....	15
	5.9 Réglementations et normes :.....	15
	5.10 Coûts et complexité de production :.....	16
6	Comportement mécanique des simulations numériques :.....	18
	6.1 Prévion du comportement mécanique :.....	18
	6.2 Optimisation de la conception :.....	19
	6.3 Réduction des coûts et des risques :.....	19
	6.4 Amélioration de la durabilité :.....	19
7	Les avantages dans les poutres hybrides de propriétés mécaniques et thermiques :...20	
	7.1 Réduction des concentrations de contraintes :.....	20
	7.2 Propriétés thermomécaniques améliorées :.....	20
	7.3 Durabilité et ténacité accrues :.....	20
	7.4 Flexibilité dans la conception :.....	21
8	Connections entre les matériaux dans les poutres hybrides :.....	21

8.1	Évaluation des types de connections :.....	21
8.2	Réduction des concentrations de contraintes :.....	22
8.3	Validation expérimentale :.....	22
8.4	Comportement thermique en situation d'incendie :.....	22
8.5	Comportement mécanique sous charge :.....	23
8.6	Modélisation des matériaux à gradient fonctionnel (FGM) :.....	23
8.7	Validation expérimentale :.....	23
9	Les principales utilisations de ces structures hybrides dans les constructions modernes :.....	24
9.1	Constructions commerciales et industrielles :.....	24
9.2	Projets architecturaux innovants :.....	24
9.3	Rénovations et extensions :.....	24
9.4	Avantages environnementaux :.....	25
10	Les avantages mécaniques de matériaux complémentaires :.....	25
10.1	Synergie matérielle pour une résistance accrue :.....	25
10.2	Optimisation des connexions pour une répartition des charges :.....	26
10.3	Contrôle des modes de rupture :.....	26
10.4	Réduction des effets d'échelle et des instabilités :.....	26
10.5	Applications et performances :.....	27
11	Conception des connecteurs :.....	27
11.1	Avantages techniques:.....	27
11.2	Mécanisme de fonctionnement:.....	27
11.3	Types de connexions :.....	28
11.4	Les types de clés de cisaillemen:.....	28
CHAPITRE II :.....		30
1.	Introduction :.....	30
2.	Évaluation expérimentale :.....	30
3.	Procédures de conception :.....	34
3.1.	Résistance au cisaillement :.....	34
3.2.	Résistance à la flexion :.....	38
3.3.	Conception à clavette de cisaillement :.....	41

3.4. Dimensions transversales :	45
CHAPITRE III :	47
1. INTRODUCTION.....	47
2. Analyse numérique.....	47
2.1. Outils d'analyse	47
2.2. Model Numérique	49
2.2.1. Modèle élastique linéaire :.....	49
2.2.2. Modèle plastique (ou élasto-plastique) :.....	49
2.2.3. Les modèles s'appuyant sur la théorie de la plasticité et de l'endommagement :.....	50
2.2.4. Les lois constitutives du modèle d'endommagement adopté :.....	51
2.2.5. Modèles de comportement des aciers (élastique plastique avec écrouissage).....	52
3. Analyse du comportement globale	56
4. Conclusion	68
CHAPITRE IV	69
1. Conclusion Générale	69
2. Perspectives de Recherche – Explication Détaillée	70

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : microscopie électronique à balayage (SEM) montre la surface de fracture d'un échantillon de PRF, mettant en évidence les différentes caractéristiques anatomiques qui échouent lors de la propagation de la fissure.	Error! Bookmark not defined.
Figure 2 :(a) Eprouvettes avant écrasement, (b) Eprouvette après écrasement (rupture).....	6
Figure 3: Profils de fissurations pour les trois poutres.	6
Figure 4: les différents modes de rupture du béton.	7
Figure 5: illustre les mécanismes d'endommagement dans les composites stratifiés, notamment le décollement fibre/matrice et le délaminage	8
Figure 6: corrosion des aciers avec éclatements de béton dus manque d'enrobage des armatures.....	9
Figure 7:Poutre mixte acier-béton avec connecteurs soudés.	15
Figure 8: Double WT – Un exemple de connexion Moment	19
Figure 9: Poutres hybrides acier-bois.	20
Figure 10: a) Représentation schématique des échantillons ; b) Dispositif d'essai et échantillon ; c) Zones d'une connexion hybride à un élément de poutre	28
Figure 11:Essai et charge numérique – réponse au déplacement à mi-portée d'échantillons sélectionnés: a) B25-R10-W20-S11S, c) B36-R10-W20-S8, d) B25-R10-W0-S8, e) B10-R10-W20-S8.	43
Figure 12:Réponse uniaxiale pour un cycle (traction-compression) pour un béton.	49
Figure 13: Essai et charge numérique et expérimentale et réponse au déplacement	Error! Bookmark not defined.
Figure 14:Représentation schématique de cast3M.....	Error! Bookmark not defined.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Performances comparées	11
Tableau 2:Applications et performances	24
Tableau 3 : Résultats des tests et validation numérique	42
Tableau 4 :Détails matériels et géométriques du modèle de référence	43
Tableau 5: compare les quatre spécimens testés, en mettant en parallèle les résistances expérimentales.....	63
Tableau 6:Synthèse comparative :.....	64

Introduction Générale

Les structures hybrides, combinant des matériaux aux propriétés mécaniques complémentaires comme le béton armé (BA) et l'acier, représentent une solution innovante dans le domaine de la construction moderne. Ces systèmes permettent de tirer parti des avantages de chaque matériau : la résistance à la compression du béton et la ductilité de l'acier. Cependant, leur performance dépend largement de la conception et de l'efficacité des dispositifs de connexion, tels que les clés de cisaillement, qui assurent la transmission des efforts entre les éléments hétérogènes. Dans un contexte où les exigences de durabilité, de résistance aux charges dynamiques (sismiques, vent) et d'optimisation des coûts sont croissantes, l'étude numérique de ces systèmes hybrides revêt une importance capitale pour garantir leur fiabilité et leur efficacité. Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective en visant trois objectifs principaux : Comprendre les mécanismes de transfert de charges entre les poutres en BA et les poteaux en acier via les clés de cisaillement, en évaluant leur efficacité sous différents types de sollicitations, et Analyser la performance structurale globale des systèmes hybrides, en identifiant les modes de déformation et les mécanismes de rupture potentiels à travers des simulations numériques avancées, et Proposer des optimisations de conception pour les clés de cisaillement, afin d'améliorer la résistance, la ductilité et la durabilité des interfaces béton-acier. Ces objectifs s'appuient sur une validation rigoureuse des modèles numériques par comparaison avec des données expérimentales et des références bibliographiques, notamment les travaux de Vincent Crozet. Une approche méthodologique rigoureuse a été adoptée, articulée autour de trois axes : Modélisation numérique : Utilisation du logiciel Cast3M pour simuler le comportement des structures hybrides sous charges statiques et dynamiques, en intégrant des lois constitutives avancées pour le béton (modèles d'endommagement) et l'acier (élasto-plasticité avec écrouissage). Validation expérimentale : Confrontation des résultats numériques avec des essais en laboratoire, incluant des analyses paramétriques pour évaluer l'influence de facteurs tels que la géométrie des clés de cisaillement ou la résistance des matériaux, Optimisation et recommandations : Proposition de solutions techniques pour améliorer les connexions hybrides, basées sur les résultats des simulations et des essais. Ce mémoire est organisé en trois chapitres principaux :

Dans le domaine du génie civil moderne, la recherche de solutions constructives plus performantes, économes en matériaux et rapides à mettre en œuvre a conduit à un intérêt croissant pour les systèmes hybrides. Ces structures combinent les qualités complémentaires du béton armé (BA), excellent en compression, et de l'acier, performant en traction et ductilité. Une application typique de cette hybridation est l'association de poutres en béton armé avec des poteaux en acier, une solution déjà adoptée dans plusieurs projets de grande hauteur ou à fortes sollicitations. Cette configuration nécessite néanmoins une attention particulière à la zone d'interface entre les matériaux, où le transfert efficace des efforts constitue un défi technique majeur. Les clés de cisaillement y jouent un rôle central pour garantir la continuité mécanique. Ce mémoire s'inscrit donc dans une démarche de compréhension et d'optimisation de ces systèmes mixtes.

Le bon fonctionnement des connexions entre les poutres en béton armé et les poteaux en acier repose principalement sur la performance des dispositifs de transfert d'effort au niveau de l'interface : les clés de cisaillement. Malgré l'existence de recommandations générales dans l'Euro code 4 et les travaux antérieurs (notamment ceux de Vincent Crozet), la conception optimale de ces clés, en particulier dans des configurations spécifiques (zones composites, zones de transition, zones non composites), reste peu documentée. Ainsi, les objectifs de ce travail sont : d'analyser numériquement le comportement de ces connexions hybrides, de caractériser les mécanismes de transfert d'effort, de proposer des recommandations de dimensionnement basées sur les résultats expérimentaux et les modélisations numériques.

L'approche adoptée repose sur une étude numérique à l'aide de la méthode des éléments finis (MEF), appuyée par des résultats expérimentaux récents. Une première partie du travail est consacrée à la revue de la littérature et aux normes de calcul applicables (Euro code 2 et code American). La deuxième partie aborde la modélisation numérique des assemblages hybrides, avec une attention particulière portée aux zones de transition. Enfin, la dernière partie présente une analyse critique des résultats, propose des formules de calcul adaptées, et confronte les résultats aux méthodes normatives existantes. Ce mémoire ambitionne ainsi de fournir aux ingénieurs des outils de conception plus fiables pour les structures hybrides BA/acier.

CHAPITRE I :

1. Introduction :

Les systèmes composites acier-béton offrent des performances améliorées par rapport aux structures en béton armé ou en acier. La conception de nombreux éléments composites acier-béton est bien comprise et réglementée, mais des solutions innovantes peuvent être nécessaires pour répondre à des contraintes spécifiques. Ces solutions peuvent inclure des formes structurelles hybrides non conventionnelles, qui combinent plusieurs matériaux distincts. En plus de l'amélioration de l'efficacité structurelle, ces arrangements hybrides permettent également de réaliser des économies significatives. Les mécanismes de transfert de force entre l'acier et le béton dans les éléments composites ont été étudiés précédemment. Des recherches expérimentales ont également été menées sur des systèmes hybrides acier-béton, tels que des murs en béton armé avec des profils en acier encastrés ou des planchers en béton armé soutenus par des colonnes en acier. Ces études visent à renforcer les capacités et à améliorer la ductilité de ces structures pour des bâtiments de grande hauteur ou des charges élevées. Différents systèmes de clés de cisaillement ont été proposés pour transférer la charge du plancher aux poteaux en acier, améliorant ainsi les performances de ces connexions par rapport aux composants en béton armé. Des goujons de cisaillement soudés, des plaques d'acier et des barres d'armature pliées ont été utilisés, de même que des inserts d'acier courts et des clés de cisaillement de longueur intermédiaire. D'autres systèmes utilisent des plaques d'acier horizontales et des raidisseurs verticaux soudés aux poteaux. Ces systèmes permettent une meilleure résistance au cisaillement et une meilleure capacité de transfert en flexion, ainsi qu'une meilleure dissipation d'énergie. Cependant, la recherche sur les connexions hybrides entre les poteaux en acier et les éléments bidirectionnels est limitée. De plus, des différences significatives existent entre les connexions hybrides aux poutres en béton armé et celles aux dalles bidirectionnelles, en raison de la géométrie des éléments. Des études expérimentales antérieures ont été menées sur ces connexions hybrides.

- **Systèmes Hybrides Poutre en BA et Poteau en Acier :**

Un système hybride poutre en béton armé (BA) et poteau en acier est une structure composite qui combine les avantages des deux matériaux. Le béton armé offre une bonne résistance à la compression et une inertie thermique, tandis que l'acier fournit une excellente résistance à la traction et une ductilité élevée. L'utilisation de poteaux en acier permet de réduire les dimensions des éléments porteurs, augmentant ainsi l'espace utilisable dans les bâtiments.

- **Clés de Cisaillement :**

Les clés de cisaillement sont des dispositifs mécaniques utilisés pour assurer la transmission des efforts de cisaillement entre le béton et l'acier. Elles sont généralement constituées de plaques d'acier soudées ou boulonnées au poteau en acier et encastrées dans le béton. Ces clés permettent de mobiliser la résistance au cisaillement de l'interface béton-acier, assurant ainsi une collaboration efficace entre les deux matériaux. assurant la transmission des efforts entre les éléments [33][39].

- **Étude Numérique :**

L'étude numérique consiste à utiliser des modèles informatiques pour simuler le comportement des structures sous différents types de chargement. Les méthodes les plus couramment utilisées incluent la méthode des éléments finis (MEF), qui permet de discrétiser la structure en un grand nombre de petits éléments interconnectés. Cette approche permet de capturer les phénomènes locaux tels que les concentrations de contraintes, les fissurations du béton, et le comportement non linéaire des matériaux.

Les principaux défis dans la modélisation numérique des poutres en béton armé (BA) renforcées par des composites en polymères renforcés de fibres (PRF) sont liés à plusieurs facteurs.

- **Rupture Prématuurée de l'Adhérence :** Il existe un risque de rupture prématurée de l'adhérence entre le composite PRF et le substrat en béton. [27]
- **Comportement Complexe à l'Interface :** Le comportement à l'interface entre les composites PRF et le substrat en béton est complexe. [27]
- **Mécanismes de Rupture du Béton :** Les mécanismes de rupture du béton sont difficiles à modéliser en raison de la nature non homogène du matériau. [27]

- **Absence de Règles Constitutives Appropriées :** Le manque de règles constitutives appropriées peut empêcher de tenir compte de l'interface de contact entre le béton et le PRF, ainsi que de l'interaction entre le béton et l'armature en acier. [27]
- **Effet d'Échelle :** L'effet d'échelle peut influencer la largeur de la fissure diagonale de cisaillement, ce qui complique la modélisation. [27]
- **Décollement de la Plaque de Renforcement :** Le décollement de la plaque de renforcement est un mode de rupture fréquent dû à une forte concentration des contraintes au bord de la plaque de renforcement.

Les mécanismes de rupture les plus courants dans les poutres en béton armé (BA) renforcées par des composites PRF incluent des modes liés à la flexion, au cisaillement et aux interfaces matérielles. Ces mécanismes sont influencés par la technique de renforcement, l'orientation des fibres, et les contraintes locales.

2. Type de rupture :

2.1 Rupture par flexion :

- **Rupture du composite PRF :** Se produit lorsque la charge dépasse la capacité de résistance du composite, souvent dans les poutres sur renforcées où le PRF est le premier à atteindre sa limite.

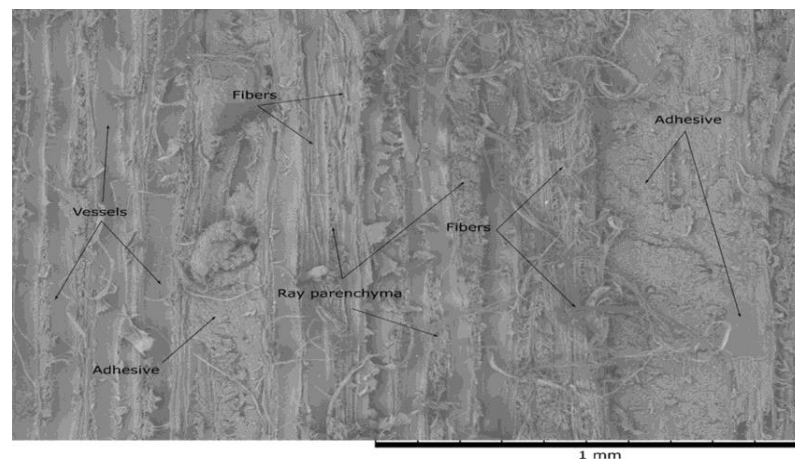


Figure 1: Image SEM de la surface de fracture d'un échantillon de PRF montrant les différentes caractéristiques anatomiques défailantes lors de la propagation de la fissure, chaque caractéristique présentant un motif AE distinct possible [56].

- **Écrasement du béton en compression** : Survient lorsque les contraintes de compression dans le béton dépassent sa résistance, notamment dans les poutres sous-renforcées.



Figure 2 : (a) Eprouvette avant écrasement, (b) Eprouvette après écrasement (rupture)[57].

2.2 Rupture par cisaillement :

- **Fissuration diagonale** : Due à des contraintes de cisaillement élevées, entraînant une fissuration oblique et une rupture brutale.
- **Effet d'échelle** : La résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la taille des poutres, un phénomène amplifié par la présence de PRF.

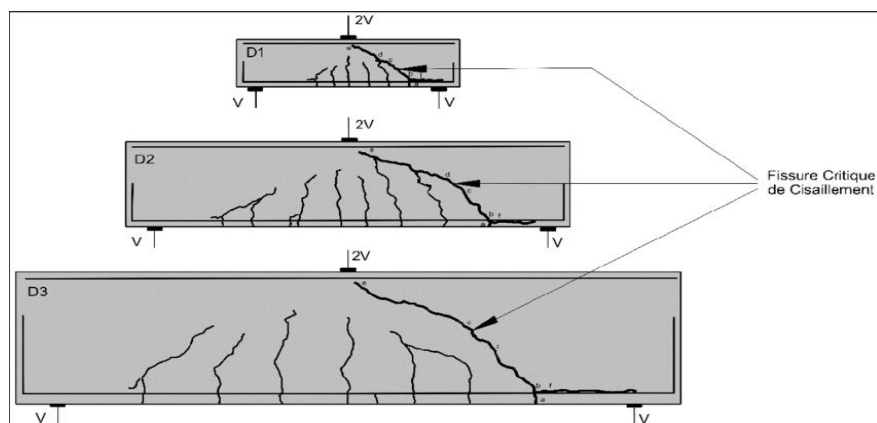


Figure 3: Profils de fissurations pour les trois poutres [58].

2.3 Décollement et délamination :

- **Décollement du PRF à l'extrémité** : Résulte de concentrations de contraintes aux zones d'ancrage, provoquant une séparation du composite
- **Séparation de l'enrobage du béton** : La couche de béton superficielle se détache avec le composite, en particulier dans les renforts en forme de « U ».
- **Décollement intermédiaire (dû aux fissures)** : Apparaît le long des fissures préexistantes ou nouvelles, perturbant l'adhérence PRF-béton.

2.4 Rupture par interaction flexion-cisaillement :

- **Modification du mode de rupture** : Des techniques comme *Stirrups in Critical Region (SCR)* transforment une rupture fragile par cisaillement en une rupture ductile par flexion, améliorant la sécurité.



Figure 4: les différents modes de rupture du béton [59].

2.5 Facteurs influençant les mécanismes :

- **Technique de renforcement** : Les méthodes *EBR* (collage externe) et *NSM* (insertion en surface) affectent la répartition des contraintes.
- **Orientation et nombre de plis de PRF** : Une orientation optimale des fibres (p. ex., 30°/60°) et l'ajout de plis augmentent la résistance et modifient le mode de rupture.
- **Présence de pré chargement** : Les poutres pré chargées avant renforcement montrent des comportements de rupture distincts.

Ces mécanismes sont validés par des études expérimentales et numériques, mettant en évidence l'importance d'une modélisation fine des interfaces et des contraintes locales pour prédire les ruptures.

La rupture prématurée du béton dans les poutres en béton armé (BA) altère significativement leur comportement mécanique et structurel, avec des conséquences sur la capacité portante, la ductilité et la durabilité. Voici les principaux effets observés :

2.6 Réduction de la capacité portante :

- **Affaiblissement du béton** : Une rupture précoce réduit la résistance à la compression et au cisaillement. Par exemple, une exposition à 770 °C entraîne une perte de résistance due à la dégradation physico-chimique du béton et des armatures.
- **Effet d'échelle** : Les grandes poutres sont plus sensibles à une rupture fragile, avec une diminution de la contrainte de cisaillement à la rupture.

2.7 Modification des modes de rupture :

- **Passage de ductile à fragile** : Sans renforcement adapté, la rupture prématurée provoque une fissuration diagonale brutale (cisaillement) au lieu d'une déformation plastique. [28]
- **Décollement des composites** : Dans les poutres renforcées de PRF, une rupture prématurée peut causer un décollement des plaques de renforcement, surtout si l'ancrage est insuffisant. [28]

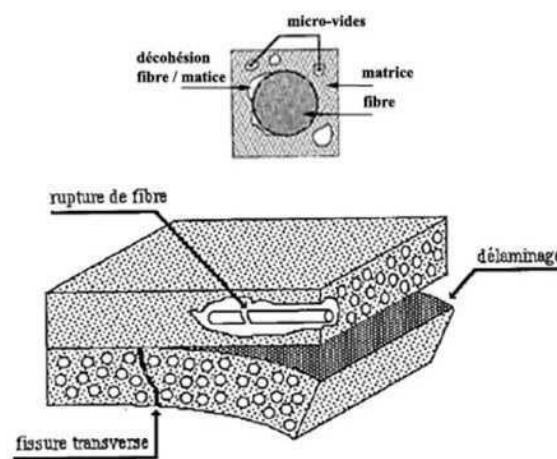


Figure 5: illustre les mécanismes d'endommagement dans les composites stratifiés, notamment le décollement fibre/matrice et le dé laminage [60].

2.8 Augmentation des déformations et fissurations :

- **Ouverture des fissures** : La rupture prématurée accélère la propagation des fissures, réduisant la rigidité de la poutre. Les

fibres métalliques ou synthétiques limitent ce phénomène en contrôlant mieux les fissures que les étriers classiques [28].

- **Déflexion accrue** : Des études montrent que les poutres non renforcées subissent des déformations plus importantes avant rupture, contrairement aux poutres renforcées avec des PRF [28].

2.9 Impact sur la durabilité :

- **Corrosion des armatures** : Une carbonatation accélérée (due à des fissures) abaisse le pH du béton, provoquant la corrosion des aciers et l'éclatement du béton.
- **Sensibilité aux conditions environnementales** : Les cycles thermiques ou l'exposition à l'humidité aggravent les dommages dans les poutres déjà fragilisées.



Figure 6: corrosion des aciers avec éclatements de béton dus au manque d'enrobage des armatures [61].

2.10 Solutions d'atténuation :

- **Renforcement par fibres** : L'ajout de 1 à 2 % de fibres métalliques augmente la résistance au cisaillement de 107 à 119 %, rivalisant avec les étriers en acier.
- **Techniques de renforcement externe** :

Les composites PRF en « U » améliorent l'ancrage et évitent les ruptures brutales [28]

Les configurations multicouches (ex. TRC2) restaurent partiellement la capacité portante après exposition à haute température.

Pour compenser la rupture prématurée du béton dans les poutres en BA, plusieurs types de renforts ont démontré leur efficacité, notamment les composites PRF, les fibres métalliques et les systèmes d'ancrage optimisés. Ces solutions améliorent la résistance, la ductilité et la durabilité des structures.

3. Renforts composites en PRF (Polymères Renforcés de Fibres) :

3.1 Configurations clés :

- **EBR (Externally Bonded Reinforcing)** : Collage externe de plaques ou lamelles en PRFC (carbone) ou PRFV (verre) sur les faces inférieures ou latérales des poutres.
- **NSM (Near Surface Mounted)** : Insertion de PRF dans des rainures superficielles du béton, offrant une meilleure adhérence que l'EBR.
- **Enveloppes en « U »** : Application de composites en forme de U autour des poutres, combinant renforcement en flexion et cisaillement. Cette configuration réduit les décollements et améliore le confinement.

3.2 Avantage :

- **Augmentation de la capacité portante** : Les poutres renforcées en PRFC voient leur résistance augmenter jusqu'à **114 %** (ex. PB4 vs PB6).
- **Ductilité améliorée** : Les tissus hybrides (verre-carbone) offrent une déformation plus élevée que le carbone pur, évitant les ruptures fragiles.
- **Réduction des fissures** : Les composites limitent l'ouverture des fissures, notamment avec des ancrages mécaniques.

3.3 Fibres métalliques intégrées au béton :

- **Dosage optimal** : L'ajout de **1 à 2 % de fibres métalliques crochétées** augmente la résistance au cisaillement de **107 à 119 %**, rivalisant avec les étriers en acier.
- **Contrôle des microfissures** : Les fibres limitent la propagation des fissures et améliorent l'engrenage des granulats, atténuant l'effet d'échelle.

3.4 Systèmes d'ancrage avancés :

- **Étriers fermés en PRF** : Un ancrage en forme de ceinturage complet (*full wrap*) améliore le confinement du béton et active la contribution des armatures existantes.
- **Ancrages mécaniques aux extrémités** : Évitent le décollement des plaques PRF sous charges cycliques, en répartissant les contraintes.

3.5 Combinaisons hybrides :

- **Tissus bidirectionnels (verre-carbone)** : Offrent un compromis entre résistance et ductilité, avec une déformation accrue par rapport au carbone unidirectionnel.
- **Renforts multi-couches** : L'ajout de plusieurs plis de PRF (ex. TFV1/TFV2) adapte le comportement mécanique aux charges spécifiques.

3.6 Performances comparées :

Type de renfort	Avantages	Limites
PRFC en U avec ancrage	Résistance accrue, rupture ductile	Coût élevé, nécessite une expertise
Fibres métalliques (1–2 %)	Contrôle des fissures, simplicité de mise en œuvre	Efficacité limitée pour les grandes poutres
Tissus hybrides verre-carbone	Ductilité améliorée, coût réduit	Résistance inférieure au PRFC pur

Tableau 1 : Performances comparées [62]

3.7 Facteurs critiques de succès :

- **Préparation des surfaces** : Décapage/sablage pour optimiser l'adhérence PRF-béton.
- **Éviter les sur renforcements** : Un excès de PRF déplace l'axe neutre et provoque une rupture prématurée du béton en compression.
- **Adaptation à l'effet d'échelle** : Les grandes poutres nécessitent des renforts plus robustes (ex. ceinturage complet) pour compenser la baisse de résistance au cisaillement.

Les tissus hybrides bidirectionnels offrent plusieurs avantages par rapport aux tissus mono fibres ou unidirectionnels, notamment en termes de résistance, de flexibilité et d'adaptabilité aux différentes applications.

4. Avantage des tissus hybrides :

4.1 Avantage des tissus hybrides bidirectionnels :

- **Résistance équilibrée** : Les tissus hybrides bidirectionnels combinent des fibres de différentes natures (par exemple, carbone et aramide, ou verre et carbone) pour offrir une résistance équilibrée dans deux directions principales. Cela permet de répondre à des exigences mécaniques variées, telles que la résistance à la traction et à la compression.
- **Résistance aux températures extrêmes** : Les combinaisons de fibres comme l'aramide et le carbone offrent une bonne résistance aux températures extrêmes, ce qui est avantageux dans des environnements difficiles.
- **Durabilité accrue** : Les tissus hybrides peuvent intégrer des fibres avec des propriétés complémentaires, comme la résistance à l'usure de l'aramide et la rigidité du carbone, pour améliorer la durabilité globale du matériau.
- **Optimisation des coûts** : En combinant des fibres à coûts différents, il est possible d'optimiser le rapport coût/performance pour des applications spécifiques.

4.2 Exemples d'applications :

- **Industrie aérospatiale** : Les tissus hybrides sont utilisés pour leur rapport résistance/poids élevé et leur résistance aux températures extrêmes.
- **Construction et génie civil** : Ils sont employés pour renforcer des structures en béton ou en bois, améliorant leur résistance aux charges et à l'usure.
- **Sports et équipements** : Les tissus hybrides sont utilisés dans la fabrication d'équipements sportifs légers et résistants, comme les planches de surf ou les cadres de vélo.

Les configurations d'assemblage efficaces pour les poutres hybrides acier-bois incluent des techniques qui optimisent la rigidité, la résistance et la durabilité de la structure. Voici quelques-unes des méthodes les plus courantes :

5. Assemblage des poutres hybrides :

5.1 Assemblages mécaniques :

- **Tenons et mortaises** : Traditionnellement utilisés pour le bois, ces assemblages peuvent être adaptés aux structures hybrides en combinant des éléments en acier pour renforcer la liaison.
- **Sabots métalliques** : Ces éléments assurent un maintien robuste tout en préservant l'esthétique naturelle du bois.

5.2 Assemblages par collage ou adhésion :

- **Adhésifs spéciaux** : Utilisés pour fixer les éléments en bois aux profilés métalliques, ces adhésifs doivent résister aux contraintes mécaniques et aux variations environnementales.
- **Collage avec des résines époxydiques** : Offre une liaison forte et durable entre les matériaux, bien que cela nécessite une préparation soignée des surfaces.

5.3 Assemblages par boulonnage ou rivetage :

- **Boulons et plaques de jonction** : Utilisés pour une installation modulable et flexible, ces assemblages permettent d'ajuster les composants en fonction des besoins structurels.
- **Rivets** : Peuvent être utilisés pour des applications où la rigidité est moins critique, bien qu'ils soient moins courants dans les structures hybrides acier-bois.

5.4 Assemblages par soudage :

- **Soudage partiel** : Peut être utilisé pour fixer des éléments métalliques à des profilés en acier, bien que cela nécessite une protection du bois contre la chaleur.

5.5 Exemples d'applications efficaces :

- **Poutres mixtes** : Dans une étude, ces poutres ont montré une amélioration significative de la résistance et de la ductilité grâce à l'association acier-bois, avec une contribution notable du bois dans le domaine plastique pour retarder les instabilités locales.
- **Assemblages complexes** : Des logiciels spécialisés comme RF-/JOINTS permettent de simuler et d'optimiser les assemblages complexes entre le bois et l'acier, en prenant en compte la géométrie et les contraintes locales.

Les poutres hybrides acier-bois se comportent de manière spécifique en situation d'incendie, bénéficiant des propriétés complémentaires des deux matériaux. Voici une analyse détaillée de leur comportement :

5.6 Comportement mécanique :

- **Résistance et ductilité** : Les poutres hybrides acier-bois montrent une meilleure résistance et ductilité que les composants individuels, grâce à la limitation des instabilités élastiques des profilés métalliques.

5.7 Résistance au feu :

- **Calculs de résistance au feu** : Pour les structures en bois, la résistance au feu peut être calculée en fonction de la vitesse de combustion et de l'épaisseur de la section non carbonisée.
- **Avantages des structures hybrides** : Les structures hybrides bénéficient de la protection thermique apportée par le bois tout en conservant la stabilité mécanique grâce à l'acier.

La production de poutres hybrides acier-bois présente plusieurs défis, liés à la combinaison de deux matériaux distincts avec des propriétés mécaniques et physiques différentes. Voici les principaux défis rencontrés :

5.8 Assemblage et connexion :

- **Techniques d'assemblage** : Les techniques traditionnelles pour le bois (tenons et mortaises) et l'acier (soudage) doivent être adaptées pour assurer une liaison robuste et durable entre les deux matériaux.

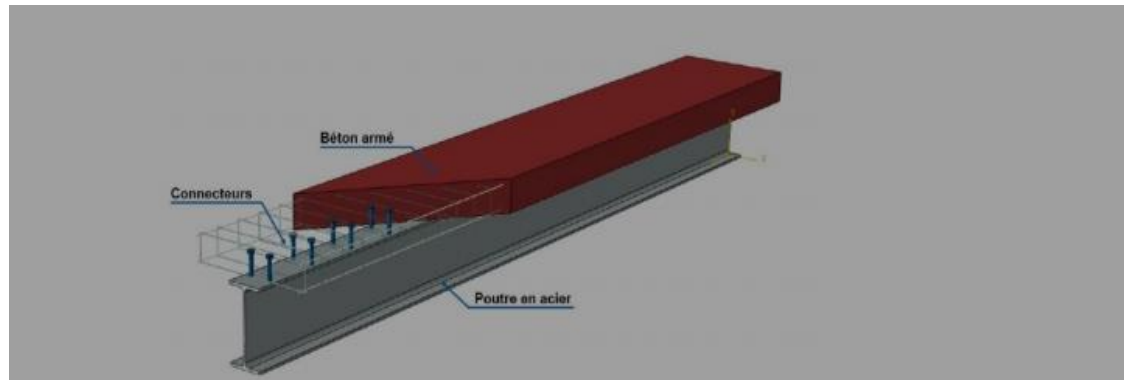


Figure 7:Poutre mixte acier-béton avec connecteurs soudés.[63]

- **Influence du degré de connexion** : Le degré de connexion entre les composants en bois et en acier peut affecter le comportement mécanique de la structure hybride, notamment en termes de rigidité et de résistance¹.

5.9 Réglementations et normes :

- **Normes de construction** : Les constructions hybrides doivent répondre à des normes spécifiques qui peuvent varier selon les pays et les régions, ce qui complique leur adoption à grande échelle².
- **Assurances et garanties** : Les assureurs peuvent être réticents à couvrir des bâtiments en bois de grande hauteur, ce qui limite l'adoption de ces structures hybrides.

5.10 Coûts et complexité de production :

- **Complexité de fabrication** : La production de poutres hybrides nécessite des équipements et des compétences spécifiques pour assembler et intégrer correctement les composants en bois et en acier.
- **Coûts élevés** : Les coûts de production peuvent être plus élevés que ceux des structures traditionnelles en raison de la complexité de l'assemblage et des matériaux utilisés.

Les simulations numériques jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la conception des poutres hybrides en permettant une analyse détaillée et précise de leur comportement mécanique sous diverses conditions de charge. Voici comment ces simulations peuvent améliorer la conception :

6. Comportement mécanique des simulations numériques :

6.1 Prévission du comportement mécanique :

- **Analyse par éléments finis (EF) :** Les logiciels comme ABAQUS ou Code Aster utilisent la méthode des éléments finis pour simuler le comportement des poutres hybrides, permettant de prédire avec précision les déformations, les contraintes et les modes de rupture potentiels [29].
- **Modélisation non linéaire :** Les simulations non linéaires permettent de prendre en compte les non-linéarités géométriques et matérielles, essentielles pour prédire le comportement post-élastique des structures hybrides.

6.2 Optimisation de la conception :

- **Paramètres de conception :** Les simulations numériques permettent d'optimiser les paramètres de conception tels que la section des profilés métalliques, l'épaisseur du bois, et le type de connexion entre les matériaux [30].
- **Évaluation des différentes configurations :** Il est possible de simuler et de comparer différentes configurations d'assemblage (par exemple, collage vs. boulonnage) [30].

6.3 Réduction des coûts et des risques :

- **Tests virtuels :** Les simulations numériques réduisent le besoin de tests physiques coûteux et permettent de valider la conception avant la phase de prototypage.
- **Prévention des erreurs de conception :** En identifiant les points critiques et les modes de rupture potentiels, les simulations aident à éviter les erreurs de conception qui pourraient entraîner des défaillances structurelles.

6.4 Amélioration de la durabilité :

- **Évaluation des conditions environnementales** : Les simulations peuvent prendre en compte les conditions environnementales (température, humidité) pour évaluer l'impact sur la durabilité des poutres hybrides.
- **Optimisation des matériaux** : En analysant les propriétés des matériaux utilisés, les simulations aident à optimiser leur choix pour améliorer la durabilité et la résistance aux agressions externes.

Les matériaux à gradient fonctionnel (FGM) offrent plusieurs avantages dans les poutres hybrides, notamment en termes de propriétés mécaniques et thermiques améliorées. Voici les principaux avantages :

7. Les avantages dans les poutres hybrides de propriétés mécaniques et thermiques :

7.1 Réduction des concentrations de contraintes :

- **Gradation continue** : Les FGM présentent une variation continue des propriétés mécaniques et thermiques à travers l'épaisseur, ce qui réduit les concentrations de contraintes aux interfaces entre différents matériaux. Cela diminue le risque de fissuration et de délaminage, souvent problématiques dans les composites traditionnels.
- **Amélioration de la cohésion** : La gradation progressive des propriétés favorise une meilleure cohésion entre les différents matériaux, tels que le métal et la céramique, réduisant ainsi les singularités des contraintes.

7.2 Propriétés thermomécaniques améliorées :

- **Résistance thermique** : Les FGM peuvent combiner des propriétés contradictoires comme la conductivité thermique et l'isolation thermique, ce qui est particulièrement utile dans des environnements à haute température.
- **Résistance mécanique** : Ils offrent une résistance mécanique accrue grâce à la combinaison optimale des propriétés des matériaux utilisés, ce qui est avantageux pour les applications structurales.

7.3 Durabilité et ténacité accrues :

- **Suppression du délaminage** : La variation continue des propriétés dans les FGM élimine les interfaces nettes, réduisant ainsi le risque de délaminage et augmentant la durabilité globale de la structure.
- **Ténacité à la rupture** : Les FGM présentent une ténacité à la rupture accrue par rapport aux composites traditionnels, ce qui améliore leur capacité à résister aux chocs et aux charges imprévues.

7.4 *Flexibilité dans la conception* :

- **Adaptabilité aux conditions d'utilisation** : Les FGM peuvent être conçus pour répondre à des exigences spécifiques en termes de propriétés mécaniques et thermiques, ce qui les rend adaptés à diverses applications industrielles.
- **Optimisation des performances** : La gradation des propriétés permet d'optimiser les performances des structures en fonction des conditions d'utilisation, comme la résistance à l'usure ou à la corrosion.

Les simulations numériques jouent un rôle crucial dans l'optimisation des connections entre les matériaux dans les poutres hybrides. Voici comment ces simulations peuvent améliorer ces connections :

8. **Connections entre les matériaux dans les poutres hybrides** :

8.1 **Évaluation des types de connections** :

- **Comparaison entre différentes méthodes** : Les simulations numériques permettent de comparer les performances de différentes méthodes de connexion, telles que le collage ou les butées mécaniques, pour identifier la solution la plus efficace en termes de résistance et de ductilité.
- **Optimisation des paramètres de connexion** : Les simulations aident à ajuster les paramètres de connexion, comme la taille et le nombre des boulons, pour maximiser la résistance et minimiser les concentrations de contraintes.

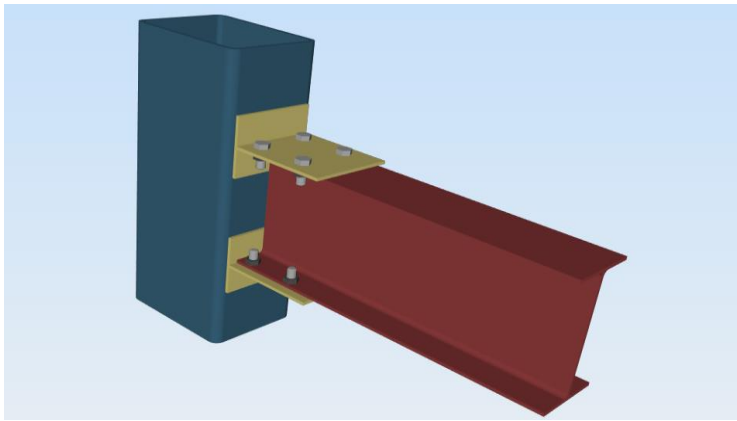


Figure 8: Double WT – Un exemple de connexion Moment [64].

8.2 Réduction des concentrations de contraintes :

- **Modélisation des interfaces** : Les simulations numériques permettent de modéliser les interfaces entre les matériaux et d'identifier les zones critiques où les concentrations de contraintes sont maximales. Cela aide à concevoir des connections qui réduisent ces concentrations et améliorent la durabilité de la structure.
- **Matériaux à gradient fonctionnel (FGM)** : L'utilisation de FGM peut réduire les discontinuités aux interfaces, améliorant ainsi la résistance globale de la structure hybride.

8.3 Validation expérimentale :

- **Confrontation avec les données expérimentales** : Les résultats des simulations numériques sont souvent confrontés aux données expérimentales pour valider leur précision et ajuster les modèles de simulation si nécessaire.
- **Amélioration continue des modèles** : Cette validation permet d'améliorer continuellement les modèles numériques pour qu'ils reflètent plus fidèlement le comportement réel des structures hybrides.

Les simulations numériques sur les poutres hybrides, telles que celles combinant l'acier et le bois, ou le béton armé avec des composites, fournissent des résultats précieux pour comprendre leur comportement mécanique et thermique. Voici quelques résultats clés issus de ces simulations :

8.4 Comportement thermique en situation d'incendie :

- **Poutres hybrides acier-bois** : Les simulations montrent que le bois protège les profilés métalliques en limitant leur échauffement grâce à sa faible conductivité thermique et à l'eau qu'il contient, ce qui prolonge la durée avant atteinte d'une température critique.
- **Comparaison avec les profilés métalliques seuls** : Les poutres hybrides acier-bois nécessitent plus de temps pour atteindre une température critique que les profilés métalliques sans protection, ce qui améliore leur résistance au feu.



Figure 9: Poutres hybrides acier-bois [65].

8.5 Comportement mécanique sous charge :

- **Poutres en béton armé renforcées de composites** : Les simulations numériques permettent d'évaluer l'effet d'échelle sur la résistance au cisaillement et de prédire les patrons de fissures diagonales de cisaillement, en accord avec les résultats expérimentaux.
- **Optimisation des paramètres de renforcement** : Les simulations aident à optimiser la configuration et la quantité de renforts pour améliorer la résistance et la ductilité des poutres.

8.6 Modélisation des matériaux à gradient fonctionnel (FGM) :

- **Poutres FGM** : Les simulations utilisent des lois de variation de rigidité (par exemple, loi de puissance ou exponentielle) pour prédire le comportement mécanique des

poutres FGM sous flexion et cisaillement. Ces modèles sont validés par des études antérieures et permettent de prédire avec précision les contraintes et déformations.

- **Avantages des FGM** : Les simulations mettent en évidence les avantages des FGM, tels que la réduction des concentrations de contraintes et l'amélioration de la durabilité.

8.7 Validation expérimentale :

- **Confrontation avec les données expérimentales** : Les résultats des simulations numériques sont souvent confrontés aux données expérimentales pour valider leur précision et ajuster les modèles de simulation si nécessaire. Cela permet d'améliorer continuellement la fiabilité des prédictions.

Les poutres hybrides, combinant différents matériaux comme l'acier, le bois, ou le béton, trouvent des applications variées dans les constructions modernes. Voici les principales utilisations de ces structures hybrides :

9. Les principales utilisations de ces structures hybrides dans les constructions modernes :

9.1 Constructions commerciales et industrielles :

- **Structures en acier-bois** : Ces structures hybrides sont utilisées pour créer des espaces ouverts et robustes dans les bâtiments commerciaux et industriels, offrant une combinaison de résistance et d'esthétique.
- **Planchers et toitures** : Les poutres hybrides sont employées pour réaliser des planchers et des toitures solides, en particulier dans les projets nécessitant une grande portée et une flexibilité de conception.

9.2 Projets architecturaux innovants :

- **Gratte-ciels en bois** : Les poutres hybrides sont utilisées dans la construction de gratte-ciels en bois, qui visent à réduire l'empreinte carbone tout en offrant une résistance et une durabilité accrues.

- **Ponts et structures civiles** : Les structures hybrides acier-bois sont également employées dans la construction de ponts et d'autres ouvrages d'art pour leur résistance et leur durabilité.

9.3 Rénovations et extensions :

- **Surélévation et restauration** : Les poutres hybrides sont idéales pour les projets de surélévation ou de restauration de bâtiments anciens, offrant une solution légère et robuste pour supporter les nouvelles charges¹.
- **Mezzanines et structures en hauteur** : Elles sont utilisées pour créer des mezzanines et des structures en hauteur dans les bâtiments existants, améliorant ainsi l'espace disponible sans alourdir excessivement la structure.

9.4 Avantages environnementaux :

- **Construction durable** : Les poutres hybrides, en combinant des matériaux renouvelables comme le bois avec des matériaux plus traditionnels, offrent une solution durable et respectueuse de l'environnement.
- **Réduction de l'empreinte carbone** : Elles contribuent à réduire l'empreinte carbone des constructions en utilisant des matériaux plus légers et en minimisant les déchets.

En résumé, les poutres hybrides sont utilisées dans une large gamme d'applications, allant des constructions commerciales aux projets architecturaux innovants, tout en offrant des avantages environnementaux significatifs.

Les poutres hybrides améliorent la résistance aux charges en combinant les avantages mécaniques de matériaux complémentaires (béton, acier, composites), tout en optimisant leur interaction pour répartir efficacement les efforts. Voici les mécanismes clés :

10. Les avantages mécaniques de matériaux complémentaires :

10.1 Synergie matérielle pour une résistance accrue :

- **Combinaison béton-composites (PRF) :**

Les composites comme les fibres de verre (GFRP) ou de carbone (CFRP) renforcent la traction, tandis que le béton résiste à la compression. Par exemple, un renfort en PRF

unidirectionnel ou bidirectionnel augmente la charge ultime des poutres en béton armé jusqu'à **120 %**. [32]

Exemple : Les poutres renforcées avec un tissu hybride verre-carbone montrent une meilleure ductilité et une charge de rupture supérieure grâce à la complémentarité des fibres (module élevé du carbone + déformabilité du verre) [32]

- **Hybridation acier-bois :**

L'acier apporte rigidité et résistance, tandis que le bois limite les instabilités locales (déversement, voilement) et améliore la ductilité. Les poutres mixtes SW1/SW2 démontrent une meilleure exploitation de la plasticité de l'acier grâce au confinement du bois.

10.2 Optimisation des connexions pour une répartition des charges :

- **Butées mécaniques vs collage :**

Les ancrages mécaniques (boulons) ou adhésifs influencent le mode de rupture. Les butées favorisent une rupture ductile par écrasement du béton, tandis que le collage peut provoquer un cisaillement à l'interface. Les simulations montrent que les butées améliorent la capacité portante de **114 %** contre **51 %** pour le collage seul.

- **Configurations en « U » :**

Les renforts composites en forme de U autour des poutres en béton améliorent le confinement et évitent les décollements prématurés, optimisant le transfert des efforts de cisaillement [32].

10.3 Contrôle des modes de rupture :

- **Transition fragile → ductile :**

Les poutres hybrides évitent les ruptures brutales grâce à des configurations comme *Stirrups in Critical Region (SCR)*, qui favorisent la plastification des armatures en acier avant la rupture du béton [32]

- **Prévention du cisaillement :**

Les fibres métalliques intégrées au béton (1–2 %) augmentent la résistance au cisaillement de **107 à 119 %**, rivalisant avec les étriers classiques [32]

10.4 Réduction des effets d'échelle et des instabilités :

- **Poutres treillis en acier :**

Leur géométrie triangulaire distribue uniformément les charges, réduisant le poids tout en maximisant la rigidité. L'acier à haute résistance permet des structures légères et robustes³.

- **Contribution du bois :**

Dans les systèmes acier-bois, le bois réduit les déformations élastiques de l'acier et retarde les instabilités, permettant une meilleure exploitation des déformations plastiques².

10.5 Applications et performances :

Type de poutre hybride	Amélioration de la charge ultime	Avantage clé
Béton armé + PRF en U	+120 %	Résistance au cisaillement et ductilité
Acier-bois avec ancrage mécanique	+114 %	Stabilité et résistance au feu
Béton + fibres métalliques	+119 %	Contrôle des fissures et effet d'échelle

Tableau 2: Applications et performances [28].

Les poutres hybrides améliorent la résistance aux charges en **combinant les propriétés mécaniques** de matériaux complémentaires, en **optimisant les connexions** pour répartir les efforts, et en **contrôlant les modes de rupture**. Ces systèmes permettent des structures plus légères, durables et adaptées aux contraintes complexes (sismiques, incendie). Les avancées en modélisation numérique (ABAQUS, Code_Aster) et les essais expérimentaux valident ces bénéfices, faisant des poutres hybrides une solution clé pour les constructions modernes.

11. Mécanisme de fonctionnement :

Les clés de cisaillement remplissent trois fonctions critiques : Transfert des charges verticales par adhérence et ancrage mécanique [40][44]. Résistance aux efforts tranchants via un cisaillement composite [35][46]. Compatibilité des déformations entre acier et béton sous charges dynamiques [39][42].

11.1 Avantages techniques :

Caractéristique	Béton armé	Acier	Système hybride
Résistance feu	Elevée	Faible	Améliorée [34][45]
Coût maintenance	Modéré	Elevée	Optimisé [38][43]
Rapidité mise en œuvre	Long	Rapide	Intermédiaire [41][47]
Capacité portante	Flexion	Compression	Synergie [33][36]

11.2 Conception des connecteurs :

Les clés de cisaillement doivent satisfaire :

Vérification de la rupture par arrachement (cône de béton) [44]

Calcul de la résistance au glissement selon Eurocode4 [39]

Dimensionnement anti-flambement des éléments métalliques [37][45]

Exemple typique : Une poutre BA encastrée sur un poteau métallique utilise des connecteurs en forme de goujons soudés, reprenant jusqu'à 85% des efforts tranchants tout en permettant une rotation partielle de l'assemblage [36][40].

Ce système combine donc la ductilité de l'acier avec la rigidité du béton, offrant une solution économique pour les structures soumises à des charges asymétriques ou sismiques [42][45]. Les clés de cisaillement y jouent un rôle central en garantissant le comportement monolithique de l'ensemble.

11.3 Types de connexions :

Connecteurs de cisaillement :

Description : Ces connecteurs, souvent sous forme de goujons soudés, sont essentiels pour garantir la solidarité entre les poutres en acier et les dalles en béton. Ils permettent de transférer efficacement les efforts de cisaillement tout en minimisant le glissement à l'interface des matériaux [48].

Fonctionnalité : Ils augmentent la capacité portante du système composite en permettant au béton de travailler en compression et à l'acier de travailler en traction.

Connexions soudées :

Description : Les soudures sont souvent utilisées pour créer des joints rigides qui permettent le transfert de moments de flexion entre les éléments. Elles offrent une résistance élevée et une intégrité structurelle renforcée [50][51].

Connexions boulonnées :

Description : Moins robustes que les soudures, les connexions boulonnées sont plus économiques et faciles à installer sur site. Elles sont souvent utilisées pour des assemblages temporaires ou dans des situations où une flexibilité est requise [50][51].

Connexions mixtes (boulonnées et soudées) :

Description : Certaines conceptions intègrent à la fois des boulons et des soudures pour tirer parti des avantages des deux méthodes. Cela permet d'optimiser le coût tout en maintenant une bonne résistance [50][52].

11.4 Les types de clés de cisaillement :

Goujons à tête : Largement utilisés en raison de leur installation simple et rapide [53]. Ils offrent une résistance au cisaillement égale dans toutes les directions [53].

Connecteurs composites : Ils présentent une résistance au cisaillement, une rigidité et une ductilité supérieures à celles des goujons soudés [55]

Connecteurs en forme d'OMEGA : Ils améliorent considérablement la résistance au cisaillement et la ductilité par rapport aux goujons traditionnels et permettent une meilleure répartition des forces, réduisant ainsi le risque de soulèvement de la dalle [54].

Connecteurs angulaires en forme de L : Ils présentent un comportement ductile [54].

Connecteurs PBL (Perfobond Rib) : Le connecteur PBL nécessite l'utilisation de plaques d'acier rectangulaires perforées avec des trous circulaires [53]. De nouvelles formes de connecteurs PBL comme le connecteur en forme de "Y" ont démontré une supériorité en matière de fatigue et de résistance au cisaillement [53]

.

CHAPITRE II :

1. Introduction :

Dans le but de valider les hypothèses numériques et les modèles de calcul développés dans ce travail, une campagne expérimentale approfondie a été menée sur des connexions hybrides poutre en béton armé – poteau en acier, intégrant des clés de cisaillement entièrement noyées. Ces assemblages représentent une solution innovante pour améliorer la performance structurale des zones critiques des portiques mixtes, notamment en conditions de chargement complexes (flexion, cisaillement, effets sismiques).

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale adoptée, la description des éprouvettes, les caractéristiques des matériaux utilisés, ainsi que les dispositifs de mesure mis en place. L'objectif est d'identifier les modes de ruine caractéristiques de ces connexions, d'évaluer l'influence des paramètres géométriques (comme la longueur et la section de la clé) et mécaniques (résistance des matériaux, taux d'armature), et de proposer des recommandations pour le dimensionnement. Les résultats obtenus permettront de mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre les éléments en béton et les inserts métalliques, et serviront de base de validation pour les simulations numériques présentées dans les chapitres suivants.

2. Évaluation expérimentale :

Des connexions hybrides entre des poteaux en acier et des poutres en béton armé, intégrant des clés de cisaillement entièrement noyées, ont été testées afin de valider la méthode numérique décrite ci-après. La configuration des éprouvettes ainsi que le dispositif expérimental sont illustrés à la Figure 1. Ces connexions peuvent être divisées en trois zones distinctes : (i) une **zone composite**, située entre la face du poteau et une distance équivalente à la longueur de la clé de cisaillement diminuée de sa hauteur ($l_v - h_a$) ; (ii) une **zone de transition**, correspondant à l'interface entre la zone composite et la zone non composite ; (iii) une **zone non composite**, située au-delà de la clé de cisaillement, où le comportement

classique du béton armé se manifeste. Ces assemblages hybrides reproduisent la zone de connexion d'une structure de type portique rigide, avec une portée d'environ **6 mètres**. Une description détaillée de l'installation expérimentale, des caractéristiques des éprouvettes et des résultats globaux issus des 14 essais de connexion est disponible dans d'autres publications [1,2].

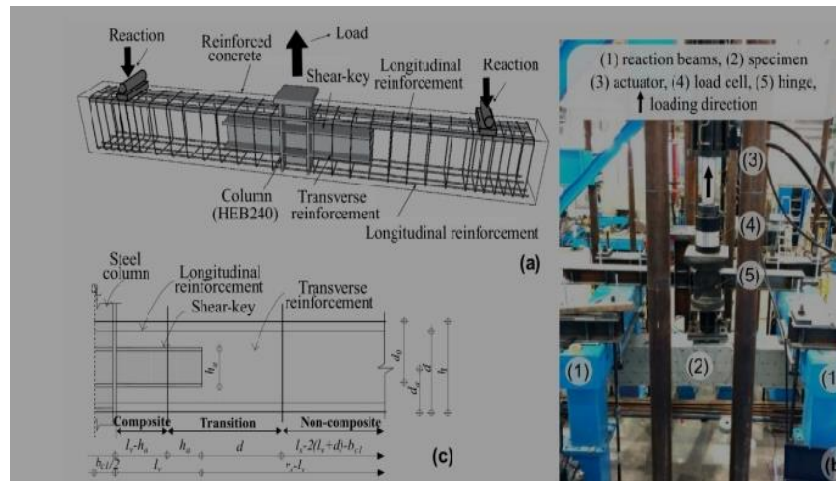


Figure 10: a) Représentation schématique des échantillons ; b) Dispositif d'essai et échantillon ; c) Zones d'une connexion hybride à un élément de poutre [66].

Toutes les poutres en béton armé testées avaient une longueur totale de 3750 mm, les poteaux étaient de type **HEB240**, et les dimensions ainsi que les sections des clés de cisaillement variaient (voir Tableau 1). La distance entre appuis, représentant une zone sans moment fléchissant, variait entre **2300** et **2600 mm**. Cette variation de portée avait pour but d'évaluer l'influence de la section des clés de cisaillement sur le comportement en cisaillement des connexions hybrides, tout en maintenant relativement constantes les rapports longueur/hauteur de la clé (**lv/ha**) et portée en cisaillement/hauteur de la clé (**av/ha**).

Le taux d'armature longitudinale à la flexion variait de **0,3 %** à **1,1 %**, tandis que pour l'armature transversale, des étriers verticaux à deux branches de **8 mm** de diamètre, espacés de **150 mm** (**$sw = 150 \text{ mm}$**), ont été utilisés pour tous les éléments, sauf ceux dépourvus d'étriers. Cette variation du taux d'armature avait pour objectif de favoriser aussi bien des ruptures en flexion qu'en cisaillement, afin de valider les formules de dimensionnement présentées dans la Section 5. Toutes les barres d'armature utilisées étaient de nuance S500B. Les essais ont révélé que les résistances mesurées à la limite d'élasticité et à la rupture des aciers des armatures variaient respectivement entre **541 et 606 MPa** pour la limite d'élasticité **f_{ys}** et entre **617 et 717 MPa** pour la résistance ultime **f_{us}** (voir Tableau 1). Quatre profils

d'acier différents ont été utilisés pour constituer les clés de cisaillement : **HEB220, HEB200, HEB180 et UC152**. Leurs caractéristiques géométriques sont présentées dans le Tableau 1. Pour ces profils, la résistance à 0,2 % de déformation f_{ya} se situait entre **369 et 446 MPa**, tandis que la résistance ultime f_{ua} allait de **493 à 579 MPa**. Les rapports longueur d'ancrage / hauteur de la section (**lv/ha**) et **rapport de raideur $\eta = I_c / I_a$** ont été modifiés selon les configurations. Le rapport η dépend du module d'élasticité du béton E_c , du moment d'inertie de la section béton I_c , du module d'élasticité de l'acier E_a et du moment d'inertie de la clé de cisaillement I_a . Enfin, le rapport **largeur / hauteur de section (b/h)** a été également étudié, avec des valeurs comprises entre **0,80 et 1,21**.

La longueur des clés de cisaillement a été modifiée afin d'étudier en profondeur le comportement des connexions hybrides pour un large éventail de rapports longueur/hauteur de clé (**lv/ha**), allant de **0,5 à 3,6**. Cette variation visait également à identifier des longueurs de clé applicables en pratique. L'élément doté de la clé la plus longue a été conçu pour favoriser un mécanisme de transmission directe des efforts (strut action), et ainsi fournir des recommandations pour le dimensionnement au cisaillement dans les zones proches des appuis.

Tous les échantillons ont été réalisés avec un béton prêt à l'emploi de classe **C25/30**, contenant des granulats d'un diamètre maximal de **10 mm**. Comme présenté dans le Tableau 1, la résistance à la compression du béton f_c mesurée le jour de l'essai à partir d'au moins trois éprouvettes, variait entre **27,3 MPa et 43,8 MPa**. La valeur la plus faible $f_c = 27,3 \text{ MPa}$ a été enregistrée pour l'éprouvette **B10-R10-W20-S8**, tandis que la plus élevée $f_c = 43,8 \text{ MPa}$ correspond à l'éprouvette **B10-R3-W20-S9S**. Ces écarts s'expliquent par le coulage des éléments en trois phases distinctes ainsi que par l'âge du béton au moment des essais, compris entre **28 et 66 jours**. Afin d'intégrer l'impact de la résistance du béton dans les évaluations analytiques de la Section 5, une analyse paramétrique non linéaire a été menée en Section 4.2.2. Dans cette analyse, seule la résistance à la compression du béton variait de **20 à 50 MPa**, tandis que les autres paramètres restaient constants.

La résistance à la compression du béton mesurée à **28 jours** variait entre **29,1 MPa et 37,1 MPa**, tandis que la résistance à la traction par fendage se situait entre **2,36 MPa et 3,19 MPa**. Tous les détails, y compris l'âge des éprouvettes au moment des essais, sont présentés dans le Tableau 1. Des essais sur éprouvettes métalliques ont également été réalisés afin de caractériser les matériaux utilisés pour les clés de cisaillement et les armatures. La limite

d'élasticité de l'acier utilisé pour les ailes des profils formant les clés de cisaillement variait de **380 MPa** à **444 MPa** (pour le profil **HEB180**). En ce qui concerne les armatures, la limite d'élasticité allait de **518 MPa** pour les barres de 8 mm de diamètre à **630 MPa** pour celles de **25 mm**. Les valeurs moyennes de ces propriétés, obtenues à partir d'au moins trois essais, sont également regroupées.

Les essais ont été réalisés en flexion trois points, avec commande en déplacement vertical dirigé vers le haut, à l'aide d'un vérin Instron de **1000 kN**. Le poteau court en acier (steel stub column) était relié par une articulation permettant de compenser les éventuelles rotations différentielles des deux poutres en console, induites par des fissurations non symétriques. L'effort de réaction était transmis à l'ensemble du dispositif d'essai au moyen de **deux** plaques en acier de **40 mm d'épaisseur** et de rouleaux de **100 mm de diamètre**, le tout contrôlé à l'aide de jauges de déformation placées sur les cadres de réaction.

Les déplacements étaient enregistrés à douze emplacements répartis le long de l'éprouvette grâce à des capteurs de déplacement linéaire. Jusqu'à quinze jauges de déformation supplémentaires étaient positionnées sur les armatures longitudinales, transversales, ainsi que sur les clés de cisaillement. Enfin, le développement des fissures et le comportement cinématique ont été observés à l'aide de jauges mécaniques '**Demec**' et d'un système de corrélation d'images numériques (Digital Image Correlation, DIC).

Dans le cadre de ce programme expérimental, deux mécanismes de rupture principaux ont été identifiés comme gouvernant le comportement des assemblages à l'état limite ultime :

- (i) des ruptures en cisaillement (S)**, déclenchées par des fissurations de traction se développant le long de la fissure critique à l'interface entre la clé de cisaillement et le béton ;
- (ii) des ruptures en flexion (F)**, causées par la plastification des armatures tendues au niveau de cette même interface critique. Les modes de rupture observés pour chaque éprouvette sont répertoriés.

Le premier mode de rupture (cisaillement, **S**) apparaissait généralement pour les configurations présentant de grandes longueurs d'ancrage et des taux d'armature élevés. Dans ces cas, l'effort nécessaire pour provoquer une rupture en flexion à l'interface entre la clé et le béton est plus important, notamment en raison du bras de levier réduit (distance entre l'extrémité de la clé de cisaillement et le bord intérieur de la plaque de chargement). Cela favorise donc l'apparition de ruptures fragiles en cisaillement à l'état ultime.

À l'inverse, pour les assemblages hybrides disposant de clés de cisaillement plus courtes (donc avec un bras de levier plus important) et de faibles taux d'armature, les efforts nécessaires à l'activation du mécanisme de flexion à l'interface sont considérablement réduits. Cela conduit à une rupture ductile par flexion au niveau de cette même interface entre clé de cisaillement et béton.

Pour l'éprouvette présentant la plus grande longueur d'ancrage de clé de cisaillement **(lv)**, un durcissement de la capacité portante ultime a été observé — contrairement aux configurations avec des clés plus courtes, qui présentaient une rupture en cisaillement.

L'augmentation significative de la résistance ultime de cette éprouvette, combinée à l'amorçage de la plastification dans l'aile supérieure de la clé de cisaillement au niveau de la face du poteau, témoigne de l'activation de deux mécanismes supplémentaires susceptibles d'influencer le comportement ultime des connexions hybrides :

Un mécanisme de bielle directe, reliant la plaque de réaction aux ailes de la clé de cisaillement, permettant une transmission plus efficace des efforts ;

Une interaction composite améliorée entre la clé de cisaillement et le béton environnant, contribuant à la montée en résistance du système.

3. Procédures de conception :

3.1 Résistance au cisaillement :

Les expressions de calcul de la résistance au cisaillement dans les zones composite et de transition, telles que décrites ici, sont basées sur les principes de l'**Eurocode2**, tout en tenant compte des caractéristiques géométriques propres aux connexions hybrides.

D'après les résultats expérimentaux et les simulations numériques précédemment présentés, il est possible de négliger la contribution du béton à la résistance au cisaillement vertical dans la zone composite, comme le recommande l'**Eurocode 4** [3]. En revanche, une contribution partielle des armatures transversales, sous forme d'étriers fermés, peut être prise en compte. Ainsi, la résistance au cisaillement de cette zone peut être évaluée comme étant la somme de

la résistance propre du profilé en acier et de celle des armatures transversales, conformément aux recommandations [3,4–5].

Il convient de noter que :

L'inclinaison de la bielle comprimée critique varie dans une plage de $1 \leq \cot \theta \leq 1,5$

Le bras de levier utilisé dans le calcul es équivalent à **75 %** de la hauteur utile en flexion

L'écrasement du béton se produit généralement dans les zones situées entre **b_c** et **b_a** [1,2].

Concernant la zone de transition, dans les cas où l'effort tranchant appliqué est inférieur à la contribution du béton à la résistance $V < V_{R,kc}$ les équations de dimensionnement reposent en grande partie sur les fondements de la version révisée de l'**Eurocode 2** [5] et sont présentées dans les équations (1) à (5).

La résistance au cisaillement notée **V_{R,c,kc}** dépend de plusieurs paramètres :

- le taux d'armature combiné **ρ_{tot}** (qui regroupe l'armature longitudinale **ρ_l** et l'armature de la clé de cisaillement **ρ_a**;
- la résistance à la compression du béton **f_c**
- la rugosité de la fissure critique **d_{dg}** fonction de la taille maximale des granulats utilisés dans le béton **d_g** comparée à la valeur de référence **d_{g0} = 16 mm** pour un béton courant)
- la profondeur efficace en cisaillement **d₀** ;
- la largeur de l'élément structural **bc**

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 \rho_{tot} f_c \frac{d_{dg}}{d_0} \right)^{1/3} * b_c d_0 \quad [\text{in KN}]$$

(1)

$$\rho_{tot} = \rho_l + \left(0.2 * l_v / d_0 \right)^3 \rho_a \quad (2)$$

avec : $\rho_a = \frac{A_a}{b c d_a}$

and : $\rho_l = \frac{A_d}{b c d} \leq 0.02$

$$d_{dg} = d_{g0} + d_g \quad [\text{in mm}] \quad (3)$$

$$d_0 = d - d_a + \frac{h_a}{2} - tf \quad [\text{in mm}] \quad (4)$$

Lorsque l'effort tranchant de dimensionnement devient supérieur à la contribution du béton à la résistance au cisaillement $V_{kc} \geq V_{R,kc}$ la résistance au cisaillement est alors assurée par l'armature transversale à l'état limite élastique $V_{R,s,kc}$, mais elle est limitée par l'écrasement du béton. Dans ce cas, il est admis que l'inclinaison de la bielle comprimée critique est fixée à **45°**, conformément aux prescriptions de **l'Eurocode 2**.

D'après une analyse à la rupture, la position de la fibre neutre dans les éprouvettes testées (voir Section 2) se situe :

au niveau de l'aile inférieure dans la zone composite des connexions hybrides ;

à une position plus basse dans le cas des poutres en béton armé conventionnelles.

Par conséquent, le bras de levier utilisé dans le calcul du cisaillement pour les éléments en béton armé ordinaires (soit $Z_c = 0,9d$) est légèrement supérieur à celui observé dans la zone de transition des connexions hybrides.

Ainsi, pour les configurations étudiées :

il est approprié de considérer un bras de levier correspondant à **75 %** de la hauteur utile en flexion dans la zone composite, et **80 %** dans la zone de transition.

Dans la zone de transition, la bielle comprimée principale repose directement sur l'aile inférieure de la clé de cisaillement. Par conséquent, sa projection verticale est réduite par rapport à celle d'une poutre classique en béton armé. De façon similaire à l'évaluation de la contribution des armatures transversales, le bras de levier Z_{kc} habituellement utilisé pour les poutres classiques, est ici diminué.

En cas de rupture par écrasement de la bielle, le bras de levier en cisaillement « hybride », noté d_0 , est défini comme étant la distance entre la face supérieure de l'aile inférieure de la clé et le centre de gravité des armatures longitudinales .

Dans ce cas, la capacité à l'écrasement est limitée par le soutien offert par les ailes de la clé de cisaillement ($b_a - t_w$).

Enfin, pour les zones de transition, l'inclinaison de la fissure critique peut être choisie dans l'intervalle $1 \leq \cot \theta \leq 1,5$, sur la base des observations expérimentales et numériques [1, 2].

$$V_{R,t,kc} = \frac{A_{sw} * Z_{kc} * f_{ys} * \cot \theta}{s_w} \leq 0.5 * \mu f_c (b_a - t_w) d_0 \quad (5)$$

$$Z_{kc} = d - \frac{c_{kc}}{2} \approx 0.8 d$$

$$C_{kc} = (c_c - c_k) / 2$$

Lorsque des charges concentrées sont appliquées à proximité de l'extrémité de la clé de cisaillement, des bielles directes (DS) se forment entre le point d'application de la charge et les ailes de la clé de cisaillement. D'après les études paramétriques précédemment décrites, il a été observé que ces bielles directes apparaissent généralement lorsque le rapport entre la portée en cisaillement et la hauteur utile est inférieur à **0,66** ($av/d < 0,66$) .

Contrairement au comportement des poutres en béton armé, où l'augmentation de la résistance due à l'appui de la bielle directe est prise en compte pour des rapports $av/d \leq 2,5$, les connexions hybrides présentent un comportement fondamentalement différent. En effet, dans ces connexions, trois bielles distinctes transfèrent les efforts depuis la zone non composite vers le poteau via la clé de cisaillement, tandis que dans une poutre en béton armé classique, la transmission des efforts se fait par une seule bielle principale, agissant sur toute la largeur de la poutre.

Pour intégrer l'effet renforçant des bielles directes dans les zones proches des appuis ($av/d_0 < 0,70$), la résistance au cisaillement peut être majorée grâce à un facteur multiplicatif $\lambda \beta = 2,5 \times d_0 / av$. Ce facteur est inspiré des hypothèses usuelles de l'**Eurocode 2**, où un facteur de réduction inverse β est appliqué à l'effort tranchant de dimensionnement.

Une validation approfondie des expressions de calcul de la résistance au cisaillement a été réalisée sur la base des essais expérimentaux et simulations numériques décrits

précédemment, en intégrant les résistances réelles des matériaux ainsi que les coefficients de sécurité usuels. La Figure 11 illustre les relations entre :

le rapport de la résistance mesurée ou simulée à la résistance calculée ($V_{\text{test/num}} / V_{\text{calc}}$ en fonction du rapport longueur/profondeur de la clé (l_v/h_a) .

et en fonction du taux de ferrailage total ρ_{tot} pour les éprouvettes et les modèles ayant présenté une rupture en cisaillement.

Un rapport $V_{\text{test}}/V_{\text{calc}} \geq 1,0$ indique une estimation sécuritaire, tandis qu'un rapport $< 1,0$ indique une sous-estimation (non conservatrice). Les résultats montrent :

- une valeur moyenne de 1,30,
- un coefficient de variation (COV) de 0,10,
- et un 5e percentile à 1,10,

ce qui démontre une prédiction globalement sécuritaire pour l'ensemble des géométries et matériaux testés. Il est à noter que ce COV de 0,10 est meilleur que ceux des modèles récents de cisaillement ou poinçonnement (généralement entre 0,10 et 0,12 [12] et 0,16 [13]) et nettement supérieur aux prescriptions des normes actuelles. En comparaison :

les COV des prédictions selon l'ACI 318 [6], l'**Eurocode 2** [7], et le Model Code 2010 – Niveau III [8], à partir de 165 essais de la base de données ACI-DafStb [9], varient entre **0,23** et **0,24**.

Enfin, il est important de noter que cette validation s'appuie sur l'hypothèse d'une contribution cumulée du béton et des armatures transversales à la résistance totale au cisaillement, comme observé via les mesures détaillées de la cinématique des éprouvettes [1]. Toutefois, pour des applications pratiques, l'utilisation du modèle de calcul du cisaillement doit suivre les recommandations décrites plus haut, en conformité avec les procédures de **l'Eurocode 2**.

3.2 Résistance à la flexion :

Comme mentionné précédemment, lorsque la section de la clé de cisaillement est très réduite par rapport à celle de la poutre dans laquelle elle est encastrée, le comportement en flexion au

niveau du pied de poteau se rapproche de celui d'un élément en béton armé classique. Cependant, à mesure que la section de la clé de cisaillement augmente, l'adhérence naturelle entre la clé en acier et le béton s'améliore, ce qui renforce l'interaction entre les deux matériaux et développe une action composite plus efficace.

Cette interaction est généralement amplifiée par une augmentation du taux d'armatures transversales, qui permettent de contenir la clé et ainsi retarder le glissement à l'interface. Toutefois, il est important de souligner qu'une compatibilité complète des déformations entre le béton et l'insert métallique ne peut pas être assurée sans la présence de connecteurs de cisaillement.

La résistance en flexion des connexions hybrides doit être vérifiée dans les trois zones définies à la Figure 1c :

Dans la zone composite et dans la zone de transition située à l'intérieur de la clé, le moment fléchissant appliqué M_k doit rester inférieur à la résistance en flexion de la section composite $M_{R,k}$, calculée à partir des caractéristiques élastiques de la section (c'est-à-dire $M_k < M_{R,k}$).

Dans la zone de transition située hors de la clé et dans la zone non composite, les moments de calcul M_{kc} et M_c doivent être inférieurs ou égaux à la résistance en flexion $M_{R,c}$ de la section en béton armé seule (soit $M_{kc} \leq M_{R,c}$ et $M_c \leq M_{R,c}$).

Le moment résistant de chaque section doit être déterminé en considérant :

la compatibilité linéaire des déformations au sein de la section,

et en supposant que les armatures longitudinales A_{sl} atteignent leur limite d'élasticité ($\sigma_{sl} = f_{ys}$).

Les efforts dans la clé de cisaillement peuvent être exprimés sous la forme $F_i = A_i \times \sigma_i$, où :

$i = a_{ft}, a_w, a_{fb}$ pour désigner respectivement l'aile supérieure, l'âme et l'aile inférieure de la clé, et A_i représente une surface d'acier équivalente à l'armature (A_{aft}, A_{aw}, A_{afb}).

De manière similaire, l'effort dans les armatures comprimées est calculé avec la même expression ($F_i = A_i \times \sigma_i$), en prenant $i = sc$ pour l'acier comprimé longitudinal.

Le module d'élasticité de l'acier est supposé identique pour les barres d'armature et la clé de cisaillement : $E_s = E_a = 200 \text{ GPa}$.

La résistance en moment fléchissant peut être calculée selon deux cas :

- pour une section composite : $M_{R,k}$ (Équation 6),
- et pour une section non composite : $M_{R,c}$ (Équation 7).

Dans les deux cas, il faut déterminer la profondeur de la zone comprimée : c_k pour la section composite (Équation 8), et c_c pour la section non composite (Équation 9). Ces valeurs sont obtenues via une procédure itérative, en posant initialement $c_{k,0} = \lambda_c \times c_c$, avec $\lambda_c \geq 1.0$, et en ajustant jusqu'à ce que l'équilibre des forces soit atteint ($c_k = c_{k,0}$), tout en respectant :

- la compatibilité linéaire des déformations,
- les conditions d'équilibre,
- et les lois de comportement des matériaux.

Dans l'équation 6, l'indice $i = \text{aft}, \text{aw}, \text{afb}, \text{sc}$ fait référence à l'aile supérieure, à l'âme, à l'aile inférieure de la clé, et à l'armature comprimée respectivement.

Enfin, le paramètre λ reflète les caractéristiques de la distribution des contraintes dans la zone comprimée, et ses valeurs sont fixées selon les normes de calcul en béton armé.

$$M_{R,k} = f_{ys} \left\{ A_{slt} \left(d - \frac{c_k}{2} \right) + \sum \left[A_i (d_i - c_k) (d_i - \frac{c_k}{2}) / (d - c_k) \right] \right\} \quad (6)$$

$$M_{R,c} = f_{ys} (A_{st} - A_{sc}) \left(d - \frac{c_c}{2} \right) + f_{ys} A_{sc} (d - d_{sc}) \quad (7)$$

$$c_k = \frac{f_{ys} \left[A_{st} + \sum A_i \left(\frac{d_i - c_{k,0}}{d - c_{k,0}} \right) \right]}{\lambda f_c b_c} \quad (8)$$

$$c_c = \frac{f_{yst} A_{st} - f_{ysc} A_{sc}}{\lambda f_c b_c} \quad (9)$$

Quatre des essais décrits dans la section 2 ont été réalisés avec un faible taux d'armatures, ce qui a conduit à des ruptures en flexion ou flexion-cisaillement. Afin de valider les principes de dimensionnement en flexion des connexions hybrides étudiées dans cet article, plus de

trente modèles numériques présentant des ruptures gouvernées par la flexion ou par un mécanisme combiné flexion-cisaillement ont été comparés aux expressions de calcul proposées.

En utilisant les équations 6 à 9, tenant compte de la géométrie spécifique des éléments, des caractéristiques des matériaux et du type de chargement, la résistance en flexion a été évaluée à deux niveaux :

au pied de poteau, correspondant à la zone composite (section composite),

et à l'interface, c'est-à-dire dans la zone de transition (section en béton armé seule).

Dans toutes les évaluations, les coefficients de sécurité matériaux ont été pris égaux à **1.0** ($\gamma_i = 1.0$), afin de comparer directement les résultats aux prévisions théoriques.

La Figure 13 illustre la relation entre le rapport des forces d'essai ou numériques sur la résistance en flexion théorique ($P_{\text{test/num}} / P_{\text{flex}}$) et le taux d'armature combiné (ρ_{tot}).

- Les valeurs supérieures ou égales à **1.00** indiquent des estimations conservatrices (donc sûres),
- tandis que les valeurs inférieures à **1.00** signalent des estimations non sécuritaires.

Comme illustré sur la figure, tous les points de données correspondant aux essais ou modèles ayant échoué en flexion se situent au-dessus de la ligne 1:1, ce qui indique une surestimation sécuritaire.

En revanche, les spécimens ou modèles ayant développé un flambement en flexion, mais également une fissure de cisaillement accompagnée de déformations plastiques dans les armatures transversales, apparaissent généralement sur ou en dessous de cette ligne, traduisant une interaction flexion-cisaillement.

En moyenne, le rapport $P_{\text{test/num}} / P_{\text{flex}}$ pour les éprouvettes et modèles en rupture de flexion est de **1.14**, avec un coefficient de variation de **0.12**, et un 5e centile égal à **1.01**. Cela confirme la pertinence des équations 6 à 9 pour prédire les modes de rupture en flexion, en fournissant des estimations fiables et conservatrices sur l'ensemble des valeurs du taux d'armature combiné (ρ_{tot}).

Ainsi, l'approche proposée pour évaluer la résistance en flexion dans les différentes zones de la connexion hybride s'avère robuste et fiable.

3.3 Conception à clavette de cisaillement :

La conception de la section transversale de la clé de cisaillement (shear-key) peut être évaluée en utilisant la compatibilité linéaire des déformations dans la section composite, en tenant compte des efforts de dimensionnement maximaux dans cette zone .

Cela peut être réalisé en modélisant toute la pièce métallique insérée (shear-key) comme une seule barre d'armature placée au centre géométrique de la section, en appliquant les relations constitutives classiques et en supposant une inertie de seconde moment fissurée de la section composite.

L'inertie fissurée de la section en béton dépend de la position de la fibre neutre et varie généralement entre **30 %** et **70 %** de l'inertie de la section non fissurée.

D'après les résultats expérimentaux, à la rupture, un rapport moyen $\mathbf{ck/d} \approx \mathbf{0,4}$ a été observé ($\mathbf{ck}$ = profondeur de la zone comprimée, $\mathbf{d}$ = hauteur utile).

L'inertie de la clé de cisaillement ($\mathbf{I_a}$) peut être calculée (équation 10) en tenant compte de la compatibilité des déformations et de l'écoulement plastique de l'acier d'armature principal. De même, la surface résistante au cisaillement ($\mathbf{A_{a,v}}$) (équation 11) est obtenue en supposant que l'ensemble du cisaillement de calcul ($\mathbf{V_k}$) est repris par la clé de cisaillement.

La longueur de l'insert métallique ($\mathbf{l_v}$) doit respecter les quatre conditions données dans l'équation 12 :

- Le transfert des efforts depuis l'élément porteur vers le poteau s'effectue via un champ de compression qui s'appuie sur la semelle inférieure de la clé ; la largeur de cette semelle ($\mathbf{b_a - t_w}$) doit donc être suffisante.
- Le transfert via les bielles de compression est limité par la capacité de l'armature transversale.
- La longueur d'appui de la bielle doit être supérieure à sa projection horizontale pour assurer un transfert des efforts vers un nombre suffisant de barres transversales.
- La longueur de la clé de cisaillement ($\mathbf{l_v}$) doit être supérieure à sa profondeur ($\mathbf{h_a}$).

Puisque le pré-dimensionnement à la flexion est effectué en tenant compte de la réponse en flexion de la clé dans une section composite, il est nécessaire de vérifier que sa section résiste aux moments fléchissant induits par les réactions d'appui.

Les essais ont montré que la forme de la distribution des forces de réaction évolue avec la longueur de la clé de cisaillement [1, 2].

Indépendamment de sa longueur, au moins un tiers de la force de réaction est transféré dans une zone de $h_a/2$ à partir de la face du poteau, tandis que le reste de la force est transmis sur la longueur $l_v - h_a/2$.

Cela donne lieu à une distribution doublement rectangulaire avec un pic d'intensité à la face du poteau ($vE1 \geq vE2$).

Le moment résistant requis (M_a) dû à cette distribution de forces doit être inférieur à la capacité élastique en flexion de l'insert métallique ($M_{a,el,R}$), évaluée selon les procédures de l'Eurocode 3 [4].

Le moment de calcul peut être estimé à partir de cette distribution doublement rectangulaire. Dans une approche simplifiée, notamment pour les clés courtes et rigides, cette distribution peut être modélisée par une force unique appliquée à l'extrémité de la clé de cisaillement

.

$$I_G \geq \frac{M_K(d - c_K)}{10f_{ys}} \quad (10)$$

$$A_{a,v} \geq \frac{2V_K}{f_{ys}/\sqrt{3}} \quad (11)$$

$$I_V = \max \left(\frac{V_K}{0.5v(b_a - t_w)f_c}, \frac{V_K s_w}{A_{sw}f_{yw}}, d_0 \cot \theta, h_a \right) \quad (12)$$

$$M_a = \frac{V_K}{6} \left(l_v + \frac{h_a^{2.75}}{8l_v} \right) \quad (13)$$

Pour l'ensemble des caractéristiques géométriques et des matériaux étudiés dans les essais expérimentaux, la clé de cisaillement noyée (shear-key) a présenté une résistance suffisante, sans défaillance locale de l'insert métallique, même à la rupture.

Pour mieux comprendre la distribution des efforts tranchants et des réactions au niveau de la clé de cisaillement, des analyses paramétriques ont montré que, dans le cas de faibles taux d'armature longitudinale (par exemple $\rho_l = 0,3 \%$), la clé de cisaillement reprend une plus grande part des efforts par rapport aux cas avec un taux d'armature plus élevé ($\rho_l = 1,1-1,9 \%$) [10,11].

Dans le premier cas, environ **80 %** de l'effort total est transféré par la clé de cisaillement, tandis que ce taux diminue dans le second cas, pouvant descendre jusqu'à **40 %**.

Comme attendu, cette répartition dépend fortement de la raideur de la clé ainsi que de la rigidité globale de la section transversale.

D'un point de vue conservatif, on peut supposer en phase de dimensionnement que l'intégralité des efforts est reprise par la clé de cisaillement, que ce soit en flexion ou en cisaillement.

présente une comparaison entre les propriétés de section des clés de cisaillement issues des modèles numériques et celles obtenues à partir des équations de calcul (11 et 13), en fonction du rapport longueur/hauteur de la clé (**lv/ha**).

Comme observé sur la Figure 15a, les équations de dimensionnement exigeraient des sections plus importantes que celles utilisées dans les modèles où la tôle verticale (âme) n'a pas atteint la limite d'élasticité. Cela montre que les expressions proposées fournissent une approche de conception sécuritaire pour l'ensemble des rapports **lv/ha**.

À noter que dans les analyses paramétriques, la taille des sections a été modifiée progressivement, sans suivre une stratégie de conception spécifique.

La dispersion observée sur la Figure 15 traduit que certaines clés modélisées sont surdimensionnées, avec une capacité en cisaillement et en flexion plus grande que nécessaire.

Concernant la résistance en flexion, il a été observé que les clés très courtes (**lv/ha < 1,0**) ne mobilisaient que **10 à 15 %** de la résistance en flexion de la section transversale, tandis que les clés longues (**lv/ha > 5,0**) atteignent la limite élastique, ce qui est attendu vu leur grande

surface d'interaction acier-béton, leur meilleure adhérence et le développement d'un comportement composite.

Toutefois, pour offrir un appui rigide aux bielles de transfert d'effort et garantir un comportement élastique de la clé de cisaillement, l'insert en acier devrait avoir une longueur intermédiaire, soit l_v/ha compris entre **2,0** et **4,0**.

Une analyse détaillée des équations de pré-dimensionnement de la longueur d'ancrage (Équations 10 et 12) montre que, si l'on estime cette longueur uniquement à partir de la capacité en compression des bielles, on obtient des valeurs très faibles (inférieures à **$ha/2$**), ce qui peut être irréaliste.

En effet, une résistance élevée du béton permet de transférer davantage de charge via la bielle, mais cela augmente la déformabilité de la clé.

Une approche alternative plus réaliste consiste à supposer que la pression induite par la force de réaction est égale à la contrainte dans la bielle, correspondant à la mise en charge plastique des étriers. Cette hypothèse fournit des longueurs d'insert plus réalistes, similaires à celles utilisées dans les essais, à condition que le taux d'armature transversale soit suffisant pour assurer un confinement adéquat de la clé de cisaillement.

Tableau 3 : Résultats des tests et validation numérique

Spécimen	Clé de cisaillement	l_v/ha (-)	l_v (mm)	l_s (mm)	d (mm)	ρ_l (%)	ρ_w (%)	f_c (MPa)	f_{ya}/f_{ua} (MPa)	f_{ys}/f_{us} (MPa)
B25-R10-W0-S8	HEB200	2.5	500	2600	409	1.09	—	28.6	401/530	606/716
B10-R10-W20-S8	HEB200	1	200	2600	412	1.09	0.19	27.3	401/530	606/716
B25-R10-W20-S8	HEB200	2.5	500	2600	408	1.09	0.19	34.3	401/530	606/716
B25-R10-W20-S11S	HEB180	2.5	450	2450	402	1.11	0.19	39.8	444/579	606/716

3.4 Dimensions transversales :

HEB200: $ba \times tf/da \times tw/Aa = 200 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}/200 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}/7810 \text{ mm}^2$.

HEB180: $ba \times tf/da \times tw/Aa = 180 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}/200 \text{ mm} \times 8.5 \text{ mm}/6530 \text{ mm}^2$.

Tableau 4 :Détails matériels et géométriques du modèle de référence

Clé de cisaillement			Géométrie RC			Renforts/étriers				Béton	
η	B	lv	bw	hc	ls	ρ	d	d_{bw}	s_w	f_c	f_{ct}
(-)	(-)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(%)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)
69	25	450	350	450	2450	1.1	405	450	8	36.1	2.96

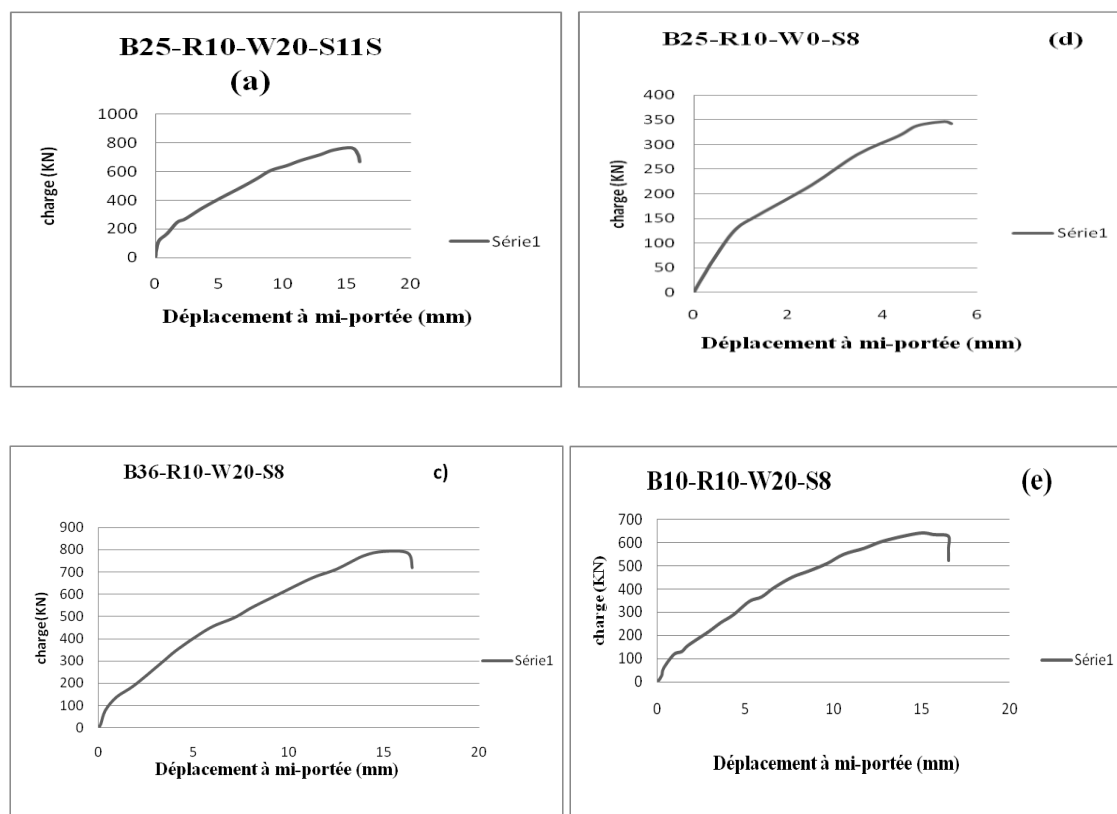


Figure 11:Essai et charge numérique – réponse au déplacement à mi-portée d'échantillons sélectionnés: a) B25-R10-W20-S11S, c) B36-R10-W20-S8, d) B25-R10-W0-S8, e) B10-R10-W20-S8 [67].

CHAPITRE III :

1. INTRODUCTION:

Dans ce travail, une approche numérique est utilisée pour analyser les systèmes hybrides avec des poutres en béton armé et des colonnes en acier reliées par des clés de cisaillement, importantes pour la transmission des forces en cas de charges horizontales comme celles dues aux séismes ou au vent. L'analyse numérique complète les approches théoriques et expérimentales en fournissant des détails sur le comportement global et local, afin de comprendre l'interaction des matériaux, évaluer les contraintes et analyser l'impact des paramètres géométriques sur la structure. Le chapitre expose la modélisation adoptée, le maillage, les lois de comportement et intègre les clés de cisaillement. Il détaille les conditions aux limites, les charges étudiées et les outils numériques utilisés (comme Cast3M) pour simuler le comportement réel du système et garantir la sécurité et la durabilité de la structure.

L'objectif principal de cette analyse numérique est de reproduire le plus fidèlement possible le comportement réel du système hybride, afin de valider les hypothèses de conception et d'identifier les zones critiques susceptibles d'influencer la sécurité et la durabilité de la structure.

2. Analyse numérique :

2.1 Outils d'analyse :

Le programme Cast3M est un logiciel de calcul par éléments finis développé par le CEA en France, offrant une flexibilité de modélisation grâce à son langage de commande puissant et une structure modulaire. Il est utilisé dans les milieux académiques et de la recherche pour sa capacité à gérer des simulations complexes et pour son accessibilité aux utilisateurs souhaitant personnaliser leurs simulations. Gratuit et régulièrement mis à jour, Cast3M propose une interface textuelle et graphique, ainsi que des bibliothèques étendues pour la modélisation de structures statiques ou dynamiques. Sa maîtrise nécessite une compréhension des méthodes numériques et du langage spécifique. Cast3M est un outil de référence pour les ingénieurs et chercheurs en génie mécanique ou civil souhaitant effectuer des simulations numériques précises et personnalisées.

Les principales étapes d'un calcul avec Cast3M, logiciel de calcul par la méthode des éléments finis, se décomposent en quatre grandes phases :

Choix de la géométrie et du maillage :

Cette étape consiste à définir la géométrie du modèle à analyser en précisant les points, lignes, surfaces et volumes, puis à réaliser la discrétisation de cette géométrie en éléments finis adaptés au problème.

Définition du modèle mathématique :

Il s'agit de caractériser précisément le problème à résoudre, en définissant :

Le type d'analyse (par exemple, déformations planes, axisymétrie, analyse thermique, mécanique, fluide, etc.)

Le comportement des matériaux (élasticité, plasticité, viscoplasticité, etc.)

Les propriétés matérielles (constantes d'élasticité, masse volumique, etc.)

Les propriétés géométriques des éléments (épaisseur des coques, sections des poutres, etc.)

Les conditions aux limites et sollicitations appliquées

Les conditions initiales éventuelles.

Résolution du problème discrétisé :

Cette phase comprend :

Le calcul des matrices de rigidité, de masse et d'amortissement pour chaque élément fini

L'assemblage de ces matrices pour la structure complète

L'application des conditions aux limites et des chargements

La résolution numérique du système d'équations obtenu, par exemple $K \cdot u = F$ pour une analyse statique linéaire.

Analyse et post-traitement des résultats :

Après résolution, les résultats sont traités pour en extraire des grandeurs physiques pertinentes (déplacements, contraintes, déformations, etc.) et visualiser ces données. Cast3M offre des outils pour contrôler les données, archiver les résultats, et éventuellement reprendre ou itérer le calcul.

2.2 Model Numérique :

Le béton est un matériau hétérogène, quasi-fragile, dont le comportement mécanique varie selon la nature des sollicitations (compression, traction, flexion) et leur niveau d'intensité. Sa modélisation numérique nécessite donc une représentation adaptée de ses propriétés mécaniques. Deux grandes approches sont couramment utilisées : le modèle élastique linéaire et le modèle plastique.

2.2.1 Modèle élastique linéaire :

Dans une première approche simplifiée, le béton est modélisé comme un matériau élastique linéaire isotrope, valable uniquement dans le domaine des faibles sollicitations (avant fissuration ou écrasement). Ce modèle repose sur la **loi de Hooke** :

$$\sigma = E * \varepsilon$$

où :

- σ est le tenseur des contraintes.
- E est le module d'élasticité du béton.
- ε est le tenseur des déformations.

Ce modèle suppose que le béton se comporte de manière réversible et linéaire tant que les contraintes restent inférieures à la limite d'élasticité. Bien que simple à mettre en œuvre, ce modèle ne permet pas de simuler correctement la fissuration en traction ni la non-linéarité en compression

2.2.2 Modèle plastique (ou élasto-plastique) :

Pour représenter plus fidèlement le comportement non linéaire du béton, notamment sa ductilité limitée en compression et sa fragilité en traction, un modèle plastique est nécessaire. Ce type de modèle prend en compte :

Une surface de charge (critère de rupture) souvent basée sur les critères de **Drucker-Prager**, Mohr-Coulomb, ou plus spécifiquement le modèle de **William-Warnke** ou **Drucker-Prager** modifié pour béton.

Une loi d'écoulement plastique décrivant l'évolution des déformations plastiques.

Une loi de durcissement ou d'adoucissement (softening) pour simuler l'endommagement progressif.

2.2.3 Les modèles s'appuyant sur la théorie de la plasticité et de l'endommagement :

Le modèle de Mazars :

Dans le cadre de ses travaux de thèse, a proposé l'un des premiers modèles d'endommagement permettant de décrire le comportement du béton. Ce modèle repose notamment sur les travaux qui avait introduit une forme du potentiel d'état. Il s'agit d'un modèle local d'endommagement isotrope, dans lequel Mazars introduit la notion de déformation équivalente pour piloter l'évolution de l'endommagement. Toutefois, ce modèle présente certaines limitations importantes : il ne prend pas en compte l'effet unilatéral, ni les déformations irréversibles, et n'est pas formulé dans un cadre thermodynamique cohérent

Le modèle de LaBorderie :

Le modèle développé par **La Borderie** s'inscrit dans la continuité des travaux initiés par **Mazars**, tout en apportant des améliorations significatives. Il a pour principal objectif de prendre en compte l'effet unilatéral, c'est-à-dire la réapparition de la raideur initiale due à la refermeture des fissures lors d'un cycle de chargement traction/compression. Pour cela, plusieurs concepts ont été introduits. L'effet unilatéral est modélisé à travers deux variables d'endommagement distinctes, en fonction du signe du chargement. Par ailleurs, des déformations anélastiques (ou permanentes) sont également intégrées au modèle, liées à l'état d'endommagement de la structure.

Le modèle de Fichant :

Le modèle Fichant La Borderie (**FLB**) [14,15] constitue une extension du modèle développé par **Mazars** [16] et s'inspire des approches micro plans de Bažant[17,18] . Ce modèle

s'inscrit dans le cadre de la mécanique de l'endommagement continu, intégrant à la fois les effets unilatéraux ainsi que l'anisotropie induite par l'endommagement, notamment en cas de chargements complexes. Il permet également de maîtriser les phénomènes de localisation grâce à une méthode de régularisation énergétique, basée sur l'énergie de fissuration G_f du matériau. L'évolution de l'endommagement est contrôlée par une seule variable scalaire d , ce qui rend ce modèle compatible avec les approches basées sur la plasticité, facilitant ainsi une représentation plus réaliste du comportement du béton sous sollicitations complexes. De nombreuses études numériques ont été menées dans ce cadre pour analyser le comportement quasi-fragile du béton [19,20].

Le modèle OUF de Matallah :

Le modèle proposé par **Matallah** [21] s'inscrit pleinement dans le cadre de la thermodynamique des processus irréversibles. Son originalité réside dans le fait que l'endommagement n'est pas introduit à travers un facteur réducteur classique de type $(1 - d)$, comme c'est le cas dans la majorité des modèles existants. À la place, il est intégré en tant que multiplicateur des déformations irréversibles. La plasticité, ou plus précisément l'anélasticité, est représentée par un tenseur d'ordre deux, appelé tenseur d'ouverture de fissure ε^{uco} . Le concept fondamental du modèle repose sur une distinction claire entre endommagement et fissuration : la présence d'endommagement est nécessaire mais non suffisante pour qu'il y ait apparition de fissures [22]. Cette approche innovante permet de prendre en compte plusieurs phénomènes importants tels que l'effet unilatéral, l'anisotropie, ainsi que le couplage avec d'autres processus physiques [19,20]. Le modèle a été validé dans le cadre du calcul de structures, aussi bien pour des structures massives que pour des éléments en béton armé soumis à des chargements complexes (cycliques, sismiques ou de cisaillement). Le modèle développé par [21] a été récemment amélioré, des améliorations récentes apportées au modèle [23,24] ont permis d'y intégrer le couplage entre l'endommagement et la perméabilité, dans une optique de poro-mécanique non linéaire, notamment pour analyser les effets de la fracturation hydraulique et l'interaction fissures-perméabilité.

2.2.4 Les lois constitutives du modèle d'endommagement adopté :

Le modèle d'endommagement retenu dans cette thèse est basé sur le modèle isotrope initialement proposé par Fichant [14], auquel est associé un couplage plasticité–endommagement selon l'approche décrite dans [25]. Bien que la formulation générale du

modèle soit établie dans le cadre de l'anisotropie, elle peut être simplifiée en considérant une surface d'endommagement sphérique, ce qui conduit à une loi d'endommagement isotrope [26].

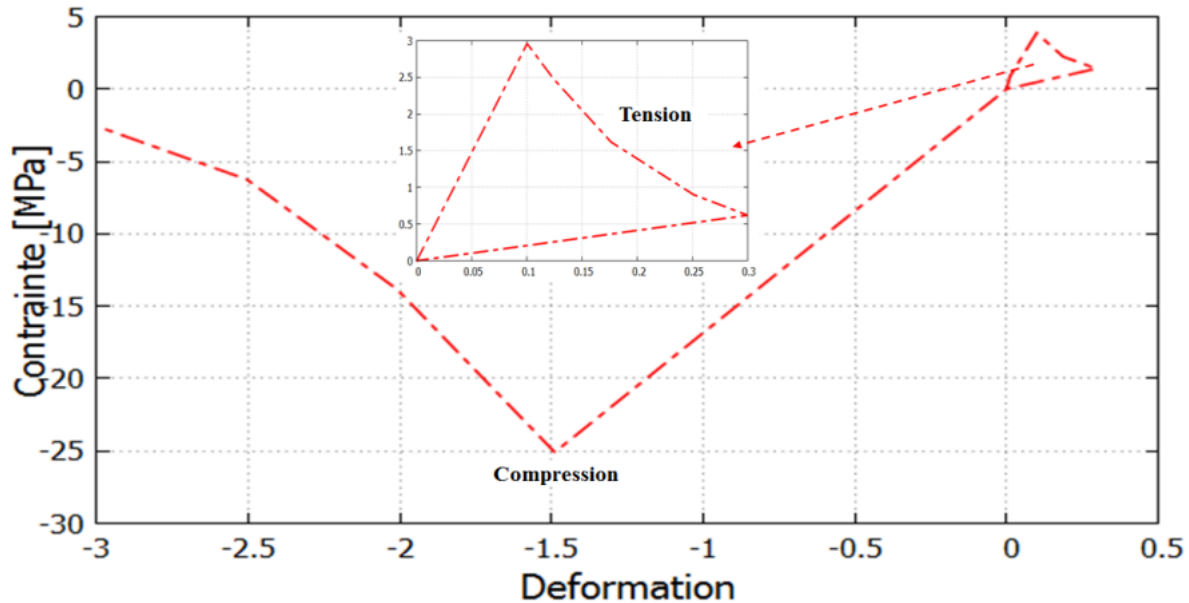


Figure 12: Réponse uniaxiale pour un cycle (traction-compression) pour un béton [68].

2.2.5 Modèles de comportement des aciers (élastique plastique avec écrouissage) :

Parmi les modèles les plus utilisés pour simuler le comportement mécanique de l'acier dans les structures, le modèle élasto-plastique avec écrouissage représente une approche réaliste et efficace. Ce modèle permet de prendre en compte à la fois la phase élastique linéaire du matériau, jusqu'à la limite d'élasticité f_y , et la phase plastique, où des déformations irréversibles apparaissent. Contrairement au modèle parfaitement plastique, qui suppose un comportement constant après f_y , le modèle avec écrouissage introduit une pente supplémentaire dans le diagramme contrainte-déformation, traduisant une augmentation progressive de la résistance du matériau au fur et à mesure que la déformation plastique se développe. Ce phénomène, appelé écrouissage, peut être de type cinématique (déplacement de la surface de plasticité) ou isotrope (expansion de la surface de plasticité). Ce type de modèle est particulièrement pertinent dans les cas de sollicitations cycliques, comme les actions sismiques, car il permet de simuler la dissipation d'énergie, les boucles d'hystérésis et les effets de fatigue progressive. Il est largement utilisé dans les logiciels de calcul non linéaire

pour évaluer la capacité portante ultime des structures métalliques et leur comportement en phase post-élastique.

Ce modèle est l'un des plus utilisés pour simuler le comportement mécanique de l'acier dans les logiciels de calcul non linéaire (tels que SAP2000, Abaqus, Cast3M, etc.). Il repose sur une courbe contrainte déformation simplifiée en deux phases :

- **Phase élastique linéaire :**

Le matériau se comporte de manière réversible jusqu'à la **limite d'élasticité f_y** , avec une pente égale au **module d'Young E** .

en appliquant la **loi de Hooke** :

$$\sigma = E * \varepsilon$$

Ou :

σ est la contrainte normale.

ε est la déformation unitaire.

E est le **module d'élasticité** de l'acier (généralement autour de 210 GPa).

Le **coefficient de Poisson** est généralement pris égal à 0,3. Cette modélisation est valable tant que la contrainte reste inférieure à la **limite d'élasticité f_y** .

- **Phase plastique avec écrouissage isotrope :**

Une fois **f_y** atteint, la contrainte continue à augmenter avec la déformation, mais selon une **pente réduite**, appelée **module d'écrouissage E_p** . Cette phase représente le **durcissement du matériau**, de manière symétrique en traction et en compression. On parle alors d'**écrouissage isotrope**, car la surface de plasticité s'élargit uniformément dans toutes les directions.

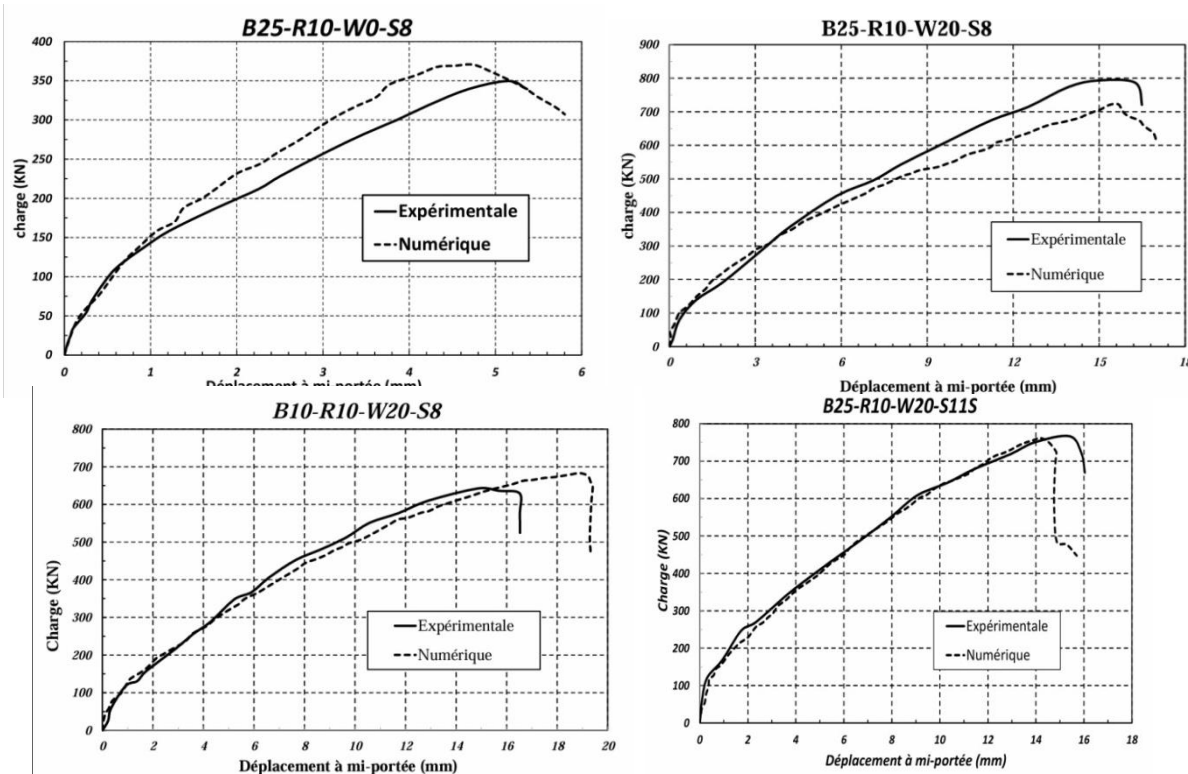


Figure 13: Essai et charge numérique et expérimentale et réponse au déplacement [67]

Ces images présentent des données expérimentales et numériques relatives à des essais de charge et de déplacement à mi-portée pour différentes configurations de structures, identifiées par des codes tels que B25-R10-W20-S8, B25-R10-W0-S8, B25-R10-W20-S11S, et B10-R10-W20-S8. Les graphiques ou tableaux associés à ces codes comparent les résultats expérimentaux et numériques, avec des valeurs de charge exprimées en (KN) et des déplacements en (mm). Les plages de charge et de déplacement varient selon les configurations, reflétant probablement des différences dans les paramètres structuraux comme les dimensions, les matériaux, ou les conditions de test. Ces données sont essentielles pour valider les modèles numériques et comprendre le comportement mécanique des structures sous charge.

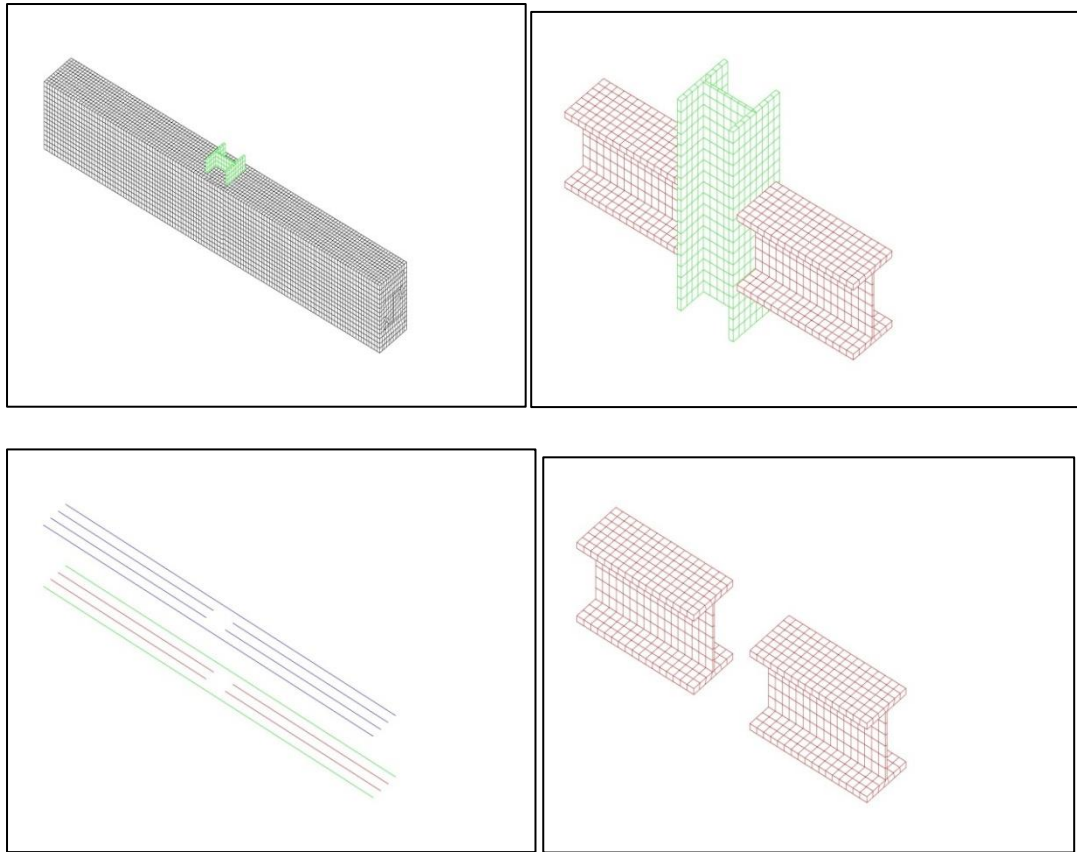


Figure 14:image de programme cast3M

Ce les quatre images représentant différentes étapes ou aspects d'une modélisation réalisée avec le logiciel Cast3M, un outil de simulation numérique utilisé en mécanique des structures, thermique, ou physique des matériaux. Chaque image illustre un résultat spécifique de la modélisation, comme des contraintes mécaniques, des déformations, ou des distributions de température.

Cast3M0 : Cette image représente la géométrie initiale du modèle, montrant la structure de base avant toute application de conditions aux limites ou de chargements.

Cast3M1: Cette capture d'écran illustre la discrétisation du modèle (maillage), essentielle pour garantir la précision des simulations numériques.

Cast3M2: L'image montre l'application des conditions aux limites (fixations, forces, etc.), une étape cruciale pour définir le comportement mécanique du modèle.

Cast3M3: Enfin, cette visualisation présente les résultats de la simulation, tels que les contraintes ou les déformations, permettant d'analyser la réponse du système sous sollicitations.

3. Analyse du comportement globale:

Pour calculer la résistance au cisaillement $V_{R,c,kc}$ selon les formules fournies, nous suivrons les étapes ci-dessous avec les données :

1^{er} cas on a : HEB200 (B25-R10-W0-S8) :

Dimensions géométriques:

$b_c=360$ mm, $d_0=300$ mm, $d_a=200$ mm, $A_a=7810$ mm², $d=409$ mm, $h=200$ mm.

Caractéristiques des matériaux:

$F_c=28.6$ MPa, $d_{dg}=10$ mm, $\rho_l=1.09\%=0.0109$, $l_s=2600$ mm, $f_{yw}=500$ MPa, $l_v/h_a=2.5$.

Longueurs de cisaillement :

Composite : $l_v=300$ mm

Transition : $l_v=609$ mm

Non-composite : $l_v=271$ mm

$$\rho_a = \frac{A_a}{b_c d_a} = \frac{7810}{360 \cdot 200} = 0.1085$$

Calcul de ρ_{tot} :

$$\rho_{tot} = \rho_l + \left(0.2 \cdot l_v / d_0\right)^3 \cdot \rho_a$$

Partie composite ($l_v=300$ mm) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 \cdot 300 / 300\right)^3 \cdot 0.1085 = 0.0118$$

Partie transition ($l_v=609$ mm) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 \cdot 609 / 300\right)^3 \cdot 0.1085 = 0.0182$$

Partie non-composite ($l_v=271$ mm) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 \cdot 271 / 300\right)^3 \cdot 0.1085 = 0.0115$$

Calcul de $V_{R,c,kc}$:

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 \rho_{tot} f_c \frac{d_{dg}}{d_0}\right)^{1/3} \cdot b_c \cdot d_0$$

Partie composite ($\rho_{tot} = 0.0118$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0118 * 28.6 * \frac{10}{300} \right)^{1/3} * 360 * 300 = 67.392 \text{ KN}$$

Partie transition ($\rho_{tot} = 0.0182$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0182 * 28.6 * \frac{10}{300} \right)^{1/3} * 360 * 300 = 77.825 \text{ KN}$$

Partie non-composite ($\rho_{tot} 0.0115$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0115 * 28.6 * \frac{10}{300} \right)^{1/3} * 360 * 300 = 66.808 \text{ KN}$$

Résultats finaux :

Partie composite : $V_{R,c,k,c} \approx 67.39 \text{ kN}$

Partie transition : $V_{R,c,k,c} \approx 77.83 \text{ kN}$

Partie non composite : $V_{R,c,k,c} \approx 66.81 \text{ kN}$

$$V_{R,c,k,c} = 212.03 \text{ KN}$$

2^{eme} cas on a :HEB200(B10-R10-W20-S8) :

Dimensions géométriques :

$b_c=360 \text{ mm}$, $d_0=300 \text{ mm}$, $d_a=200 \text{ mm}$, $A_a=7810 \text{ mm}^2$, $d=412 \text{ mm}$, $h=200 \text{ mm}$.

Caractéristiques des matériaux :

$f_c=27.3 \text{ MPa}$, $d_{dg}=10 \text{ mm}$, $\rho_l=1.09\%=0.0109$, $l_s=2600 \text{ mm}$, $f_{yw}=500 \text{ MPa}$, $l_v/h_a=1$.

Longueurs de cisaillement :

Composite : $l_v=0 \text{ mm}$

Transition : $l_v=612 \text{ mm}$

Non-composite : $l_v=568\text{mm}$

$$\rho_a = \frac{A_a}{b_c d_a} = \frac{7810}{360 \cdot 200} = 0.1085$$

Calcul de ρ_{tot} :

$$\rho_{tot} = \rho_l + \left(0.2 * l_v / d_0\right)^3 * \rho_a$$

Partie composite ($l_v=0$) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 * 0 / 300\right)^3 * 0.1085 = 0.0109$$

Partie transition ($l_v=612\text{mm}$) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 * 612 / 300\right)^3 * 0.1085 = 0.0183$$

Partie non-composite ($l_v=568\text{mm}$) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 * 568 / 300\right)^3 * 0.1085 = 0.0168$$

Calcul de $V_{R,c,kc}$:

$$V_{R,c,kc} = 0.6 \left(100 \rho_{tot} f_c \frac{d_{dg}}{d_0}\right)^{1/3} * b_c * d_0$$

Partie composite ($\rho_{tot}=0.0109$) :

$$V_{R,c,kc} = 0.6 \left(100 * 0.0109 * 27.3 * \frac{10}{300}\right)^{1/3} * 360 * 300 = 64.605 \text{KN}$$

Partie transition ($\rho_{tot} = 0.0183$) :

$$V_{R,c,kc} = 0.6 \left(100 * 0.0183 * 27.3 * \frac{10}{300}\right)^{1/3} * 360 * 300 = 76.788 \text{KN}$$

Partie non-composite ($\rho_{tot} = 0.0168$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0168 * 27.3 * \frac{10}{300} \right)^{1/3} * 360 * 300 = 74.714 \text{ KN}$$

Résultats finaux :

Partie composite : $V_{R,c,k,c} \approx 64,61 \text{ kN}$

Partie transition : $V_{R,c,k,c} \approx 76,79 \text{ kN}$

Partie non composite : $V_{R,c,k,c} \approx 74,71 \text{ Kn}$

$$V_{R,c,kc} = 216.11 \text{ KN}$$

3^{ème} cas on a :HEB200(B25-R10-W20-S8) :

Dimensions géométriques :

$b_c=360 \text{ mm}$, $d_0=300 \text{ mm}$, $d_a=200 \text{ mm}$, $A_a=7810 \text{ mm}^2$, $d=408 \text{ mm}$, $h=200 \text{ mm}$.

Caractéristiques des matériaux :

$f_c=34.3 \text{ MPa}$, $d_{dg}=10 \text{ mm}$, $\rho_l=1,09\%=0,0109$, $l_s=2600 \text{ mm}$, $f_{yw}=500 \text{ MPa}$, $l_v/h_a=2.5$.

Longueurs de cisaillement :

Composite : $l_v=300 \text{ mm}$

Transition : $l_v=608 \text{ mm}$

Non-composite : $l_v=271 \text{ mm}$

$$\rho_a = \frac{A_a}{b_c d_a} = \frac{7810}{360 * 200} = 0.1085$$

Calcul de ρ_{tot} :

$$\rho_{tot} = \rho_l + \left(0.2 * lv / d_0\right)^3 * \rho_a$$

Partie composite ($lv=300\text{mm}$) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 * 300 / 300\right)^3 * 0.1085 = 0.0118$$

Partie transition ($lv=608\text{mm}$) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 * 608 / 300\right)^3 * 0.1085 = 0.0181$$

Partie non-composite ($lv=271\text{mm}$) :

$$\rho_{tot} = 0.0109 + \left(0.2 * 271 / 300\right)^3 * 0.1085 = 0.0115$$

Calcul de $V_{R,c,k,c}$:

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 \rho_{tot} f_c \frac{d_{dg}}{d_0}\right)^{1/3} * bc * d_0$$

Partie composite ($\rho_{tot} = 0.0118$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0118 * 34.3 * \frac{10}{300}\right)^{1/3} * 360 * 300 = 71.604 \text{ KN}$$

Partie transition ($\rho_{tot} = 0.0181$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0181 * 34.3 * \frac{10}{300}\right)^{1/3} * 360 * 300 = 82.879 \text{ KN}$$

Partie non-composite ($\rho_{tot} = 0.0115$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0115 * 34.3 * \frac{10}{300}\right)^{1/3} * 360 * 300 = 70.956 \text{ KN}$$

Résultats finaux :

Partie composite : $V_{R,c,kc} \approx 71.60 \text{ kN}$

Partie transition : $V_{R,c,kc} \approx 82.88 \text{ kN}$

Partie non composite : $V_{R,c,kc} \approx 70.96 \text{ kN}$

$$\mathbf{V_{R,c,kc} = 225.44 \text{ KN}}$$

4^{eme} cas on a :HEB180(B25-R10-W20-S11S) :

Dimensions géométriques :

$b_c=360 \text{ mm}$, $d_0=280 \text{ mm}$, $d_a=180 \text{ mm}$, $A_a=6530 \text{ mm}^2$, $d=402 \text{ mm}$, $h=180 \text{ mm}$.

Caractéristiques des matériaux :

$f_c=39.8 \text{ MPa}$, $d_{dg}=10 \text{ mm}$, $\rho_l=1,11\%=0,0111$, $l_s=2450 \text{ mm}$, $f_{yw}=500 \text{ MPa}$,

$l_v/h_a=2.5$,HEB180.

Longueurs de cisaillement :

Composite : $l_v=250 \text{ mm}$

Transition : $l_v=602 \text{ mm}$

Non-composite : $l_v=328 \text{ mm}$

$$\rho_a = \frac{A_a}{b_c d_a} = \frac{6530}{360 * 200} = 0.1007$$

Calcul de ρ_{tot} :

$$\rho_{tot} = \rho_l + \left(0.2 * l_v / d_0\right)^3 * \rho_a$$

Partie composite ($l_v=250 \text{ mm}$) :

$$\rho_{tot} = 0.0111 + \left(0.2 * 250 / 280\right)^3 * 0.1007 = 0.0117$$

Partie transition ($l_v=602\text{mm}$) :

$$\rho_{tot} = 0.0111 + \left(0.2 * 602 / 280\right)^3 * 0.1007 = 0.0191$$

Partie non-composite ($l_v=328\text{mm}$) :

$$\rho_{tot} = 0.0111 + \left(0.2 * 328 / 280\right)^3 * 0.1007 = 0.0124$$

Calcul de $V_{R,c,kc}$:

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 \rho_{tot} f_c \frac{d_{dg}}{d_0} \right)^{1/3} * bc * d_0$$

Partie composite ($\rho_{tot} = 0.0117$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0117 * 39.8 * \frac{10}{280} \right)^{1/3} * 360 * 280 = 71.56 \text{KN}$$

Partie transition ($\rho_{tot} = 0.0191$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0191 * 39.8 * \frac{10}{280} \right)^{1/3} * 360 * 280 = 84.49 \text{KN}$$

Partie non-composite ($\rho_{tot} = 0.0124$) :

$$V_{R,c,k,c} = 0.6 \left(100 * 0.0124 * 39.8 * \frac{10}{280} \right)^{1/3} * 360 * 280 = 73.06 \text{KN}$$

Résultats finaux :

Partie composite : $V_{R,c,kc} \approx 71.56 \text{ kN}$

Partie transition : $V_{R,c,kc} \approx 84.49 \text{ kN}$

Partie non composite : $V_{R,c,kc} \approx 73.06 \text{ kN}$

$$V_{R,c,kc} = 229.11 \text{ KN}$$

Pour calculer la résistance au cisaillement $V_{R,t,kc}$ à l'aide de la formule fournie, nous allons suivre les étapes suivantes avec les données données :

POUR HEB200 (B25-R10-W0-S8) :

$$V_{R,t,kc} = \frac{A_{sw} * Z_{Kc} * f_{ys} * \cot \theta}{s_w} \leq 0.5 * \mu f c (ba - tw) d_0$$

$$Z_{kc} = d - \frac{c_{kc}}{2} \approx 0.8 d$$

Donnée :

$A_{sw}=100,5\text{mm}^2$, $Z_{kc}=368.1 \text{ mm}$, $f_{ys}=606 \text{ MPa}$, $\cot\theta=1$, $S_w=200 \text{ mm}$, coefficient de Poisson $\nu=0,3$, $f_c=28.6 \text{ MPa}$, $ba=200 \text{ mm}$, $t_w=9 \text{ mm}$, $d_0=300 \text{ mm}$.

Première partie de la formule :

$$V_{R,t,kc} = \frac{100.5 * 368.1 * 606 * 1}{200} = 112.9 \text{ KN}$$

Vérification de la limite :

$$0.5 * \mu f c (ba - tw) d_0 = 0.5 * 0.3 * 28.6 * (200 - 9) * 300 = 245.82 \text{ KN}$$

La valeur calculée $V_{R,t,kc}=112.9 \text{ KN}$ est bien inférieure à la limite de 245.82 kN , donc la résistance au cisaillement est de 112.9 kN

Donc : $V_{R,t,kc} = 112.9 \text{ KN}$

POUR HEB200 (B10-R10-W20-S8) :

$$V_{R,t,kc} = \frac{A_{sw} * Z_{Kc} * f_{ys} * \cot \theta}{s_w} \leq 0.5 * \mu f c (ba - tw) d_0$$

$$Z_{kc} = d - \frac{c_{kc}}{2} \approx 0.8 d$$

Donnée :

$A_{sw}=100,5\text{mm}^2$, $Z_{kc}=370.8\text{ mm}$, $f_{ys}=606\text{ MPa}$, $\cot\theta=1$, $S_w=200\text{ mm}$, coefficient de Poisson $\nu=0,3$, $f_c=27.3\text{ MPa}$, $b_a=200\text{ mm}$, $t_w=9\text{ mm}$, $d_0=300\text{ mm}$.

Première partie de la formule :

$$V_{R,t,kc} = \frac{100.5 \cdot 368.1 \cdot 606 \cdot 1}{200} = 112.9\text{KN}$$

Vérification de la limite :

$$0.5 * \mu f c(b_a - t_w) d_0 = 0.5 * 0.3 * 28.6 * (200 - 9) * 300 = 245.82\text{KN}$$

La valeur calculée $V_{R,t,kc}=112.9\text{KN}$ est bien inférieure à la limite de 245.82 kN , donc la résistance au cisaillement est de 112.9 kN

Donc : $V_{R,t,kc} = 112.9\text{ KN}$

POUR HEB200 (B25-R10-W20-S8) :

$$V_{R,t,kc} = \frac{A_{sw} \cdot Z_{kc} \cdot f_{ys} \cdot \cot \theta}{s_w} \leq 0.5 * \mu f c(b_a - t_w) d_0$$

$$Z_{kc} = d - \frac{c_{kc}}{2} \approx 0.8 d$$

Donnée :

$A_{sw}=100,5\text{mm}^2$, $Z_{kc}=367.2\text{ mm}$, $f_{ys}=606\text{ MPa}$, $\cot\theta=1$, $S_w=200\text{ mm}$, coefficient de Poisson $\nu=0,3$, $f_c=34.3\text{ MPa}$, $b_a=200\text{ mm}$, $t_w=9\text{ mm}$, $d_0=300\text{ mm}$.

Première partie de la formule :

$$V_{R,t,kc} = \frac{100.5 \cdot 367.2 \cdot 606 \cdot 1}{200} = 111.82\text{KN}$$

Vérification de la limite :

$$0.5 * \mu f c(b_a - t_w) d_0 = 0.5 * 0.3 * 34.3 * (200 - 9) * 300 = 294.81\text{KN}$$

La valeur calculée $V_{R,t,kc}=111.82\text{KN}$ est bien inférieure à la limite de 294.81 kN , donc la résistance au cisaillement est de 111.82 kN

Donc : $V_{R,t,kc} = 111.82 \text{ KN}$

POUR HEB180 (B25-R10-W20-S11S) :

$$V_{R,t,kc} = \frac{A_{sw} * Z_{Kc} * f_{ys} * \cot \theta}{s_w} \leq 0.5 * \mu f_c (b_a - t_w) d_0$$

$$Z_{Kc} = d - \frac{c_{Kc}}{2} \approx 0.8 d$$

Donnée :

$A_{sw} = 100.5 \text{ mm}^2$, $Z_{Kc} = 321.6 \text{ mm}$, $f_{ys} = 606 \text{ MPa}$, $\cot \theta = 1$, $s_w = 200 \text{ mm}$, coefficient de Poisson $\nu = 0.3$, $f_c = 39.8 \text{ MPa}$, $b_a = 180 \text{ mm}$, $t_w = 8.5 \text{ mm}$, $d_0 = 280 \text{ mm}$.

Première partie de la formule :

$$V_{R,t,kc} = \frac{100.5 * 321.6 * 606 * 1}{200} = 97.93 \text{ KN}$$

Vérification de la limite :

$$0.5 * \mu * f_c (b_a - t_w) d_0 = 0.5 * 0.3 * 39.8 * (180 - 8.5) * 280 = 286.68 \text{ KN}$$

La valeur calculée $V_{R,t,kc} = 97.93 \text{ KN}$ est bien inférieure à la limite de 286.68 kN , donc la résistance au cisaillement est de 97.93 kN

Donc : $V_{R,t,kc} = 97.93 \text{ KN}$

Pour HEB200 (B25-R10-W0-S8) :

$$V_{cal} = \max(V_{R,c,kc}, V_{R,t,kc}) = \max(212.03 \text{ KN}, 112.9 \text{ KN})$$

$$V_{cal} = 212.03 \text{ KN}$$

Pour HEB200 (B10-R10-W0-S8) :

$$V_{cal} = \max(V_{R,c,kc}, V_{R,t,kc}) = \max(216.11 \text{ KN}, 112.9 \text{ KN})$$

$$V_{cal}=216.11\text{KN}$$

Pour HEB200 (B25-R10-W20-S8) :

$$V_{cal}=\max(V_{R,c,kc}, V_{R,t,kc})=\max(225.44\text{KN}, 111.82 \text{ KN})$$

$$V_{cal}=225.44\text{KN}$$

Pour HEB180 (B25-R10-W20-S11S) :

$$V_{cal}=\max(V_{R,c,kc}, V_{R,t,kc})=\max(229.11\text{KN}, 97.93 \text{ KN})$$

$$V_{cal}=229.11\text{KN}$$

Spécimen	$V_{exp}(\text{KN})$	$V_{num}(\text{KN})$	$V_{cal}(\text{KN})$	$V_{exp}/V_{cal}(\text{KN})$	V_{num}/V_{cal} (KN)	Mode de défaillance
B25-R10- W0-S8	175	185.275	212.03	0.82	0.87	estimations non sécuritaires
B10-R10- W20-S8	323.5	341.58	216.11	1.49	1.58	estimation sécuritaire
B25-R10- W20-S8	355	360.99	225.44	1.57	1.6	estimation sécuritaire
B25-R10- W20-S11S	376.5	380.74	229.11	1.64	1.66	estimation sécuritaire

Tableau 5: compare les nquatre spécimens testés, en mettant en parallèle les résistances expérimentales.

Le tableau compare quatre spécimens testés, en mettant en parallèle les résistances expérimentales (V_{exp}), numériques (V_{num}) et analytiques (V_{cal}). L'analyse repose sur les rapports V_{exp}/V_{cal} et V_{num}/V_{cal} , qui permettent d'évaluer si les formules de dimensionnement sont sécuritaires (conservatrices) ou non.

Spécimen B25-R10-W0-S8 : Estimation non sécuritaire :

$V_{exp}/V_{cal} = 0.82$, $V_{num}/V_{cal} = 0.87$. La résistance expérimentale est inférieure à la résistance théorique. Cela signifie que le calcul surestime la capacité réelle, ce qui n'est pas sécuritaire. Ce spécimen est le seul à présenter un sous-dimensionnement, probablement dû à l'absence de renfort transversal (W0)

Spécimen B10-R10-W20-S8 : Estimation sécuritaire :

$V_{exp}/V_{cal} = 1.49$, $V_{num}/V_{cal} = 1.58$. Les résultats mesurés et simulés sont largement supérieurs aux prévisions analytiques. Cela montre une bonne marge de sécurité. Présence d'un renforcement transversal (W20) et rapport l_v/h_a modéré (1.0) favorisent un comportement fiable.

Spécimen B25-R10-W20-S8 : Estimation sécuritaire :

$V_{exp}/V_{cal} = 1.57$, $V_{num}/V_{cal} = 1.60$. Même tendance que le précédent : résistance réelle bien supérieure au calcul. Le taux d'armature et la section de clé sont plus élevés que dans B10-R10, ce qui renforce la capacité.

Spécimen B25-R10-W20-S11S : Estimation très sécuritaire :

$V_{exp}/V_{cal} = 1.64$, $V_{num}/V_{cal} = 1.66$. Il s'agit du spécimen le plus performant parmi les quatre. La clé de cisaillement **HEB180** et un taux d'armature optimisé contribuent à la meilleure performance enregistrée. Indique que le dimensionnement est très conservateur dans ce cas.

Tableau 6: Synthèse comparative :

Critère	B25-R10-W0-	B10-R10-W20-	B25-R10-W20-	B25-R10-W20-
---------	-------------	--------------	--------------	--------------

	S8	S8	S8	S11S
Résistance expérimentale	Faible	Bonne	Très bonne	Excellente
Sécurité calcul	Non sûre	Sûre	Sûre	Très sûre
Présence d'étriers (W)	Non (W0)	Oui (W20)	Oui (W20)	Oui (W20+S11S)
Taux d'armature	Haut (1.09%)	Moyen (1.09%)	Haut (1.09%)	Haut (1.11%)

La présence d'un renforcement transversal et une longueur de clé adaptée améliorent significativement la résistance au cisaillement. Les modèles analytiques sont globalement conservateurs, à l'exception notable de **B25-R10-W0-S8**, soulignant l'importance des étriers dans la conception des connexions hybrides.

4. Conclusion :

Cette étude a permis d'évaluer la résistance au cisaillement de différentes connexions hybrides poutre en béton armé – poteau en acier, en combinant des approches analytiques (formules Eurocode), des simulations numériques et des essais expérimentaux. Quatre spécimens représentatifs ont été analysés, en tenant compte de la géométrie de la clé de cisaillement, du taux d'armature longitudinale et transversale, ainsi que de la résistance du béton. Les résultats montrent une bonne concordance globale entre les valeurs expérimentales, numériques et analytiques, à l'exception d'un cas.

Les modèles analytiques de calcul ($V_{R,c,kc}$ et $V_{R,t,kc}$) se sont révélés globalement fiables pour le dimensionnement des connexions hybrides, à condition que les configurations intègrent un renforcement transversal adéquat. L'utilisation des expressions proposées permet donc d'obtenir des estimations conservatrices, essentielles pour assurer la sécurité structurale des assemblages.

CHAPITRE IV

1. Conclusion Générale :

Ce travail de recherche s'est intéressé à l'étude numérique et expérimentale du comportement des systèmes hybrides associant des poutres en béton armé et des poteaux en acier, en mettant un accent particulier sur l'efficacité des **clés de cisaillement** assurant la transmission des efforts à l'interface des deux matériaux. Il s'inscrit dans le contexte de la recherche de solutions structurelles innovantes, performantes et adaptées aux exigences croissantes de l'ingénierie moderne (résistance, rapidité d'exécution, économie de matériaux).

Le premier chapitre a présenté les bases théoriques et les enjeux de l'utilisation des systèmes hybrides BA-acier. Il a mis en évidence l'importance d'une bonne conception des connexions, en particulier à l'interface poutre-poteau, pour assurer la continuité structurale et la résistance globale de la structure. Il a été montré que les clés de cisaillement sont essentielles pour garantir cette interaction, en empêchant le glissement relatif entre béton et acier.

Le second chapitre a développé une **analyse numérique** approfondie basée sur la méthode des éléments finis (**Cast3M**), permettant de simuler le comportement des assemblages hybrides sous différents chargements. L'accent a été mis sur trois zones clés :

- **Zone composite** (collaboration forte entre BA et acier),
- **Zone de transition** (interface critique),
- **Zone non composite** (comportement classique du BA).

Les simulations ont montré que l'efficacité des clés de cisaillement dépend fortement de paramètres géométriques (longueur, hauteur, rapport d'ancrage l_v/h_a) et du taux de ferrailage. Des ruptures en cisaillement ont été observées dans les cas de clés longues et armatures denses, tandis que des ruptures en flexion apparaissent lorsque ces paramètres sont réduits. La modélisation a permis de proposer des expressions analytiques validées par l'Eurocode 2 et adaptées à la réalité des assemblages mixtes.

Dans ce dernier chapitre, les résultats expérimentaux obtenus sur 14 configurations ont été confrontés aux calculs analytiques et numériques. Les essais ont permis d'identifier deux mécanismes principaux de ruine: **rupture en cisaillement** à l'interface béton-acier, et rupture en flexion de la section BA. La comparaison des résultats a montré une bonne concordance

entre les essais et les prédictions théoriques, avec un rapport V_{test}/V_{calc} moyen de **1,30**, témoignant d'un modèle globalement conservatif.

L'étude a également comparé les formules de calcul proposées aux normes existantes (Eurocode 2,). Il en ressort que :

- Le modèle proposé (tenant compte de la contribution des clés et de l'armature transversale) est plus précis et moins conservateur que les modèles normatifs traditionnels ;
- Les COV (coefficient de variation) sont meilleurs que ceux observés dans l'ACI ou l'Eurocode (**0,10** contre **0,23** à **0,24**).

Apports de l'étude et Recommandations

- **Sur le plan scientifique**, cette recherche a permis de développer un modèle numérique validé pour l'étude du comportement des connexions hybrides BA-acier, enrichi par des données expérimentales précises.
- **Sur le plan technique**, des recommandations de dimensionnement ont été proposées, notamment pour le calcul du cisaillement dans les zones critiques ($a_v/d < 0.66$), intégrant la notion de bielle directe, de bras de levier réduit et de taux de ferrailage.
- **Sur le plan normatif**, le travail ouvre la voie à l'intégration de ces approches dans les règlements de dimensionnement à venir, notamment dans les extensions possibles de l'Eurocode 4 pour les connexions atypiques.

2. Perspectives de Recherche – Explication Détaillée :

Après avoir mené une étude numérique approfondie et validé nos modèles par des essais expérimentaux sur les connexions hybrides poutre BA / poteau acier avec clés de cisaillement, plusieurs axes de recherche futurs s'imposent naturellement. Ces perspectives ont pour but de renforcer la compréhension du système, d'améliorer sa conception, et de faciliter son application dans des projets réels.

Renforcement de la validation expérimentale

Pourquoi ?

Même si les essais réalisés dans notre mémoire sont riches, ils ne couvrent pas toutes les configurations possibles.

Ce qu'on peut faire :

- Réaliser des essais avec des clés de formes variées (en T, en croix, profil en U, etc.).
- Tester le système sous des sollicitations dynamiques : vibrations, tremblements de terre, vent, impact.
- Étudier le comportement à long terme : fluage, retrait du béton, corrosion des armatures.

Obtenir un comportement global du système dans des conditions plus proches de la réalité en chantier.

Amélioration des modèles numériques

Pourquoi ?

Le modèle actuel repose sur certaines hypothèses (adhérence parfaite, lois de comportement simplifiées).

Ce qu'on peut améliorer :

- Intégrer des modèles non linéaires de contact entre acier et béton.
- Simuler les fissures progressives du béton au lieu de les simplifier.
- Étudier le comportement post-rupture (ce qui se passe après les premières fissures ou plastifications).

Avoir des modèles numériques qui reproduisent fidèlement le comportement réel, même après l'apparition des défauts.

Optimisation géométrique et constructive

Pourquoi ?

Les clés utilisées actuellement peuvent être surdimensionnées ou mal placées, ce qui augmente les coûts ou diminue l'efficacité.

Ce qu'on peut optimiser :

- La forme de la clé pour maximiser le transfert d'efforts avec moins de matière.
- La position et le nombre de clés pour éviter les zones faibles.
- Utiliser des logiciels d'optimisation (ex : IA, algorithmes génétiques) pour proposer automatiquement les meilleures solutions.

Réduire le coût et le poids des structures hybrides, tout en améliorant leur sécurité.

Extension du concept à d'autres systèmes hybrides

Pourquoi ?

Le couplage poutre BA / poteau acier n'est qu'une **des nombreuses configurations hybrides** possibles.

Ce qu'on peut faire :

- Étendre l'étude aux dalles BA sur poteaux acier (planchers mixtes).
- Appliquer la méthode à des poutres en PRF (matériaux composites) ou à des structures bois-acier.
- Étudier le comportement en situation d'incendie (où l'acier se ramollit rapidement, et le béton se fissure sous la chaleur).

Faire évoluer tous les types de connexions mixtes dans le bâtiment vers une performance plus sûre et plus durable.

Contribution aux normes et outils pratiques

Pourquoi ?

Il n'existe pas encore de méthode précise de dimensionnement des clés de cisaillement dans les Eurocodes ou les normes américaines pour ces configurations hybrides spécifiques.

Ce qu'on peut faire :

- Proposer des recommandations de calcul pratiques basées sur nos résultats.

- Élaborer des abaques ou tableurs Excel pour faciliter le travail des ingénieurs de bureau d'études.
- Contribuer à la rédaction de fiches techniques ou annexes normatives dans l'Eurocode 2 ou 4.

Traduire la recherche en outils concrets pour les professionnels du BTP.

Cette recherche ouvre la voie à :

- Une meilleure compréhension des mécanismes internes dans les structures hybrides.
- Une conception plus économique et plus sûre des connexions BA/acier.

Une contribution directe au progrès des normes de conception et à la diffusion d'outils modernes pour les ingénieurs civils.

Références bibliographiques :

- [1] Bompa, D.V. and Elghazouli, A.Y., 2015. Ultimate shear behaviour of hybrid RC beam-to-steel column assemblages. *Engineering Structures*, 101, pp.318-336.
- [2] Moharram, M.I., Bompa, D.V. and Elghazouli, A.Y., 2017. Experimental and numerical assessment of mixed RC beam and steel column systems. *Journal of Constructional Steel Research*, 131, pp.51-67.
- [3] Eurocode 4, 2004. Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General Rules for buildings, EN 1994-1.1. Brussels, Belgium: CEN European Committee for Standardization; 2004
- [4] Eurocode 3, 2005. Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. EN 1993-1- 1. CEN European Committee for Standardization; 2005.
- [5] Eurocode 2, 2018. Design of Concrete Structures—General Rules and Rules for Buildings, Final Version of PT1-draft prEN 1992-1-1:2018. Brussels, Belgium: CEN European Committee for Standardization; 2018.
- [6] ACI CODE-318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI 48331, US
- [7] Eurocode 2, 2004. Design of Concrete Structures— Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, EN 1992-1-1. Brussels, Belgium: CEN European Committee for Standardization; 2004.
- [8] Model Code 2010 – final draft Vol.1 & Vol. 2, fib Bulletins 65 & 66, March 2012, Lausanne.
- [9] De Domenico, D. and Ricciardi, G., 2019. Shear strength of RC beams with stirrups using an improved Eurocode 2 truss model with two variable-inclination compression struts. *Engineering Structures*, 198, p.109359.
- [10] Moharram, M.I.S., 2018. Inelastic behaviour of hybrid reinforced concrete beam and steel column systems. PhD Dissertation, Imperial College London,

- [11] Moharram, M.I., Bompa, D.V. and Elghazouli, A.Y., 2017. 08.23: Performance and design of shear-keys in hybrid RC beam and steel column systems. *ce/papers*, 1(2-3), pp.2031-2040.
- [12] Muttoni, A., Fernández Ruiz, M. and Simões, J.T., 2018. The theoretical principles of the critical shear crack theory for punching shear failures and derivation of consistent closed-form design expressions. *Structural Concrete*, 19(1), pp.174-190.
- [13] de Sousa, A.M., Lantsoght, E.O., Yang, Y. and Mounir, K., 2021. Extended CSDT model for shear capacity assessments of bridge deck slabs. *Engineering Structures*, 234, p.111897.
- [14] Fichant S. Endommagement et anisotropie induite du béton de structures : modélisations approchées. Thèse de doctorat en Mécanique, génie mécanique, génie civil. Cachan, Ecole normale supérieure ., 1996.
- [15] Fichant S, La Borderie C, Pijaudier-Cabot G. Isotropic and anisotropic descriptions of damage in concrete structures. *Mech Cohes-Frict Mater* 1999;4:339–59.
- [16] Gangnant A. Étude de la rupture quasi-fragile d'un béton à l'échelle mésoscopique. Aspects expérimentaux et modélisation. 2016.
- [17] Bažant ZP, Prat PC. Microplane Model for Brittle-Plastic Material: I. Theory. *Journal of Engineering Mechanics* 1988;114:1672–88.
- [18] Dubé J-F, Pijaudier-Cabot G, La Borderie C. Modèle d'endommagement microplans: Modèle utilisé par le LGCNSN et le LaSAGEC. *Revue Française de Génie Civil* 2003;7:621–34.
- [19] Saliba J, Grondin F, Matallah M, Loukili A, Boussa H. Relevance of a mesoscopic modeling for the coupling between creep and damage in concrete. *Mechanics of Time-Dependent Materials* 2013;17:481–99.
- [20] Briffaut M, Benboudjema F, Laborderie C, Torrenti J-M. Creep Consideration Effect on Meso-Scale Modeling of Concrete Hydration Process and Consequences on the Mechanical Behavior. *J Eng Mech* 2013;139:1808–17.

- [21] Matallah M, La Borderie C, Maurel O. A practical method to estimate crack openings in concrete structures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 2009;
- [22] Benjamin R. Comportement des éléments de structures en béton armé dégradés par corrosion : la problématique de la modélisation de l'interface acier/béton en présence de corrosion. Doctorat. l'Université Paris Est, 2010.
- [23] Bessaid MI, Matallah M, Rouissat B. A poromechanical-damage-based-model for water-driven fracture modeling of concrete gravity dams. *Num Anal Meth Geomechanics* 2022;46:469–85.
- [24] Matallah M, La Borderie C. 3D Numerical Modeling of the Crack-Permeability Interaction in Fractured Concrete. *Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, IA-FraMCoS*; 2016.
- [25] Matallah M, La Borderie C. Inelasticity–damage-based model for numerical modeling of concrete cracking. *Engineering Fracture Mechanics* 2009;76:1087–108.
- [26] Nassima Aissaoui. Apport de la modélisation mésoscopique dans la prédiction de la fissuration des structures en béton: Aspects énergétiques et effets d'échelle 2018.
- [27] Abbasi, A., Benzeguir, Z. E. A., Chaallal, O., & El-Saikaly, G. (2022). FE modelling and simulation of the size effect of RC T-beams strengthened in shear with externally bonded FRP fabrics. *Journal of Composites Science*, 6(4), 116.
- [28] N. Attari¹ S, Amziane² M et Chemrouk³M, ¹EPAU. Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme, Alger, Algérie. ²Université Blaise Pascal, LMI, BP10448, 63000 Clermont-Ferrand, France. ³Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene Alger, Algérie.
- [29] DARWICH, hassan. (2023). Modélisation du comportement non-linéaire des poutres hybrides Composites-Bois. *Academic Journal of Civil Engineering*, 41(1), 1-9.
- [30] BEL S., «Assemblage entre profilé pultrudé et beton : comparaison entre boulonnage et collage », Journées Thématiques Techniques d'Imagerie pour la Caractérisation des Matériaux et des Structures du Génie Civil, Grenoble, Mars 2016, France.

- [31] Buzon S., Modélisation du comportement mécanique des poutres mixtes sous charges modérées : réponse élastique et comportement au cours du temps, Thèse de doctorat, Université Strasbourg 3 – Robert schuman, 2003.
- [32] Attari N, Amziane S, Chemrouk M. “Efficiency of Beam–Column Joint Strengthened by FRP Laminates” Advanced Composite Materials Journal (ACM), Vol: 19 (2010), P 171–183. Brill Publication (2010).
- [33] « Généralités », Techniques de l’Ingénieur. Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/constructions-mixtes-constructions-souples-42231210/construction-mixte-acier-beton-c2560/generalites-c2560v3niv10001.html>.
- [34] A. Béreyziat, « Étude du comportement thermomécanique de poutres mixtes acier-bois en situation d’incendie ».
- [35] « Chapitre-7-Justification-des-Sections-en-Béton-Armé-Vis-à-Vis-de-LEffort-Tranchant.pdf ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.univ-oeb.dz/fssa/wp-content/uploads/2020/03/Chapitre-7-Justification-des-Sections-en-B%C3%A9ton-Arm%C3%A9-Vis-%C3%A0-Vis-de-LEffort-Tranchant.pdf>
- [36] « 3-chapitre 01.pdf ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: http://moodle.univ-dbk.m.dz/pluginfile.php/86082/mod_resource/content/1/3-chapitre%2001.pdf
- [37] K. Abdellah, R. Abderezak, D. Benyagoub, et K. Nadir, « Analyse mécanique d’une poutre console métallique sous différentes charges mécaniques renforcée par matériaux composites. ».
- [38] G. Hassene, « Thème : Technique de sélection des méthodes de renforcement des bâtiments en béton armé ».
- [39] « (PDF) Modélisation de la connexion de cisaillement dans les structures mixtes acier-béton », in ResearchGate, sept. 2024. doi: 10.26168/ajce.42.1.12.
- [40] « Clés de cisaillement AISC | Ingénierie SkyCiv ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://skyciv.com/fr/docs/skyciv-base-plate-design/aisc-shear-lug/>
- [41] A. Zadjajoui, N. Boumechra, D. Zendagui, et A. Megnounif, « CONTRIBUTION À L’ÉTUDE DES STRUCTURES INTELLIGENTES ».
- [42] R. Sadone, « Comportement de poteaux en béton armé renforcés par matériaux composites et soumis à des sollicitations de type sismique et analyse d’éléments de

dimensionnement ».

[43] E. Augeard, « Expérimentation et modélisation du comportement mécanique de structures multi-matériaux bois-béton ».

[44] « BETON ARME.pdf ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/596/1/BETON%20ARME.pdf>

[45] « Structures mixtes acier béton 2 ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://gc.univ-batna2.dz/structures-mixtes-acier-b%C3%A9ton%C2%A02>

[46] É. Michaud, « Résistance en cisaillement des poutres en béton armé renforcé de fibres d'acier et synthétiques avec analyse de l'effet d'échelle ».

[47] « Programmes de calcul de béton armé », EGF. Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.egfbtp.com/programmes-de-calcul-2/>

[48] H. L. SA, « Les planchers mixtes acier béton - Ask HILTI ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hilti.lu/engineering/article/les-planchers-mixtes-acier-b%C3%A9ton/das7zi>.

[50] W. Kuang, « Types de connexions en acier et leurs classifications | SkyCiv ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://skyciv.com/fr/technical/types-of-steel-connections-and-their-classifications/>

[51] « Généralités », Techniques de l'Ingénieur. Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-les-superstructures-du-batiment-tiacd/archive-2/construction-mixte-acier-beton-c2560/generalites-c2560niv10001.html>

[52] « Construction Composite Acier-Béton ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.escglobalgroup.com/fr/post/construction-composite-acier-b%C3%A9ton>

[53] « REVIEW OF VARIOUS SHEAR CONNECTORS IN COMPOSITE STRUCTURES », The Hong Kong Institute of Steel Construction, déc. 2021. doi: 10.18057/IJASC.2021.17.4.8.

[54] P. Keo, C. Lepourry, H. Somja, et F. Palas, « Behavior of a new shear connector for U-shaped steel-concrete hybrid beams », J. Constr. Steel Res., vol. 145, p. 153-166, juin 2018, doi: 10.1016/j.jcsr.2018.01.028.

[55] « Research on the Shear Behaviour of Composite Shear Connectors ». Consulté le: 12 février 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/10/1726>

[56] Jan-Willem van de Kuilen .La fractographie combinée à la reconnaissance de formes non

supervisée des signaux d'émission acoustique pour une meilleure compréhension de la propagation des fissures dans le bois collé, Wood Science and Technology, Novembre 2019, Accéder à

l'article [ResearchGate+1ResearchGate+1decisionsindentistry.com+1ResearchGate+1](#)

[57] Rachid Rabehi. Comportement du béton autoplaçant (BAP) en présence de poudre de verre, December 2021, University of Science and Technology Houari Boumediene (USTHB).

[58] Belbachir, A., Alam, S., Matallah, M., & Loukili, A. (2016). Effet d'échelle sur le comportement en cisaillement des poutres en béton armé : Analyse avec corrélation d'images. Academic Journal of Civil Engineering, 34(1), 88-96.

[59] Abdelhafid Nouali, M. Matallah – "Flexural ductility of RC elements: influences of size effects and bending-shear interaction", Journal of Materials and Engineering Structures, 2018.

[60] A. Thionnet. Prédiction de l'endommagement sous chargements quasi-statiques et cycliques des structures composites stratifiées. Thèse Université Paris 6, 1991.

[61] Véronique Bouteiller, Jean-François Cherrier, Valérie L'Hostis et Nuria Rebolledo, « Influence of humidity and temperature on the corrosion of reinforced concrete prisms », European Journal of Environmental and Civil Engineering, vol. 16, nos 3-4, 1er avril 2012, p. 471–480

[62] Smith, J., & Tan, K.H, Comparative Performance of Steel-Concrete Composite and Conventional Reinforced Concrete Structures under Seismic Loads, Engineering Structures, 2019

[63] M. I. Tabet-derraz, "Comportement et modélisation des connecteurs dans une structure mixte (acier-béton) To cite this version : HAL Id : tel-03874580 soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr," 2022.

[64] section padding="30px 0" [one half] separator headline="h2" title="What is a Moment Connection, Source: SkyCiv Connection.

[65] Poutres POSI® : Ces poutres ajourées associent la légèreté du bois à la rigidité de l'acier, facilitant le passage des installations techniques.mitek.fr.

[66] D. Ricles, R. Sause, M. Peng, L.-W. Lu (2002). "Experimental Evaluation of Earthquake Resistant Steel Connections with Reinforced Concrete Slabs." Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 128, No. 1, pp. 17–26.

[67] Kang, T. H.-K., Wallace, J. W. (2005). "Seismic performance of reinforced concrete columns with hybrid steel fiber-reinforced concrete jackets." Engineering Structures, Volume 27, Issue 5, April 2005, Pages 685–698.

[68] Mander, J. B., Priestley, M. J. N., & Park, R. (1988). "Theoretical stress-strain model for confined concrete." *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 114, No. 8, pp. 1804–1826.