

Membre de l'université Paris Lumières

Can TURGUT

Prise en compte de la liaison acier béton dans le comportement d'éléments de structure en béton armé

Résumé étendu en Français

Thèse présentée et soutenue publiquement le 14/12/2018

en vue de l'obtention du doctorat de Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil de
l'Université Paris Nanterre

sous la direction de

M. Luc DAVENNE (Professeur des Universités, Université Paris Nanterre)

et de M. Ludovic JASON (Ingénieur Chercheur, HDR, CEA)

Jury :

Rapporteur :	Mme Géraldine CASAUX- GINESTET	Maître de Conférences HDR, INSA de Toulouse
Rapporteur :	M. Panagiotis KOTRONIS	Professeur des Universités, Ecole Centrale de Nantes
Membre du jury :	Frédéric RAGUENEAU	Professeur des Universités, ENS Paris Saclay
Membre du jury :	Christophe FOND	Professeur des Universités, Université de Strasbourg

Objet

Ce document est un résumé étendu en Français du mémoire original rédigé en Anglais. Il contient le résumé en français du document original et la traduction automatique avec deepL.com de l'introduction générale, de l'introduction et la conclusion de chaque chapitre et de la conclusion générale.

Résumé

Le comportement de l'interface acier-béton a une grande importance lorsque la fissuration des structures en béton armé est étudiée. Une approche par éléments finis a été proposée par (Torre-Casanova, 2013) et (Mang, 2016) pour représenter l'interface acier-béton dans les simulations de structures à grandes dimensions. Le modèle proposé permet de calculer le glissement tangentiel entre l'acier et le béton. L'objectif de cette étude est d'améliorer ce modèle initial pour le rendre plus efficace et plus représentatif.

Le document est découpé en trois parties :

- **Le modèle initial de liaison est évalué.** puis amélioré tant en chargement monotone qu'alterné. Le nouveau modèle est validé par plusieurs applications numériques.
- **L'effet de confinement est implémenté dans le modèle de liaison acier-béton.** L'effet sur le comportement structural du confinement actif est étudié en utilisant le nouveau modèle. A partir des simulations proposées, il est montré, par l'utilisation du nouveau modèle, que l'effet de confinement actif peut jouer un rôle sur les comportements monotone que cyclique.
- **L'effet goujon est étudié avec le nouveau modèle liaison acier-béton.** Deux campagnes expérimentales différentes sont simulées avec différents modèles de renforts (1D barre et poutre) et d'interface (liaison acier-béton et liaison parfaite). Les résultats montrent que le nouveau modèle de liaison acier-béton permet de mieux reproduire les résultats expérimentaux par rapport au modèle de liaison parfaite aux échelles globale et locale.

Mots clé : Liaison acier-béton, comportement de liaison irréversible, confinement actif, effet goujon.

Introduction

Le béton armé est un matériau composite fait de béton et d'acier. Les applications des structures en béton armé sont très variables, par exemple les poutres, les ponts, les murs, les piliers, les bâtiments de confinement des centrales nucléaires, etc. L'acier et le béton ont des propriétés très différentes, ce qui implique un comportement particulièrement complexe pour le béton armé. Le béton a une grande résistance à la compression et une faible résistance à la traction. La fissuration se produit généralement dans une structure en béton armé lorsque la limite de résistance à la traction est dépassée dans le béton. Dans de nombreuses applications de génie civil, l'acier est utilisé pour compenser la faible résistance à la traction du béton. La combinaison de ces deux matériaux crée une structure résistante qui peut être utilisée dans des branches de construction très variées. Pourtant, il s'agit de matériaux complexes qui nécessitent un examen approfondi. Sous une certaine charge, les fissures peuvent s'amorcer sous forme de microfissures et se propager. Si la charge atteint une certaine limite, des macrofissures peuvent apparaître et se développer jusqu'à ce que la structure se brise. Le transfert de contrainte entre ces deux matériaux est extrêmement important pour analyser le comportement de fissuration qui peut entraîner la rupture de la structure. Le transfert de contraintes entre l'acier et le béton s'effectue par l'interface entre eux. Par exemple, lorsqu'une fissure se produit, les contraintes sur le béton environnant deviennent nulles et la charge est complètement prise par l'acier à l'endroit de la fissure. Ensuite, les forces sont progressivement transférées de l'acier au béton. Cette zone de transfert a un impact significatif sur la caractérisation de la fissuration et est directement influencée par les caractéristiques de l'interface acier-béton. La prise en compte des caractéristiques de l'interface acier-béton est donc un élément clé pour une prévision correcte de la fissuration dans les structures en béton armé.

Dans les applications numériques industrielles, l'approche la plus couramment utilisée est le modèle de collage parfait qui est basé sur le même déplacement entre l'acier et le béton. Cependant, cette hypothèse de liaison parfaite ne tient pas compte des phénomènes complexes

à l'interface acier-béton comme les désordres importants, la répartition, la propagation et la distribution des fissures, qui est directement liée à l'interface acier-béton. En littérature, plusieurs méthodes numériques ((Ngo, et al., 1967), (Reinhardt, et al., 1984), (Clément, 1987)) sont proposés pour définir le comportement des liaisons béton-acier, mais malheureusement ces méthodes présentent de nombreuses difficultés dans le calcul de structures complexes en 3D, en particulier lorsque des applications industrielles à grande échelle sont envisagées.

(Torre-Casanova, 2013) et (Mang, 2016) a proposé une approche alternative pour la simulation du comportement de liaison acier-béton adaptée aux simulations à grande échelle. Prenant en compte les interactions mécaniques entre le béton (généralement en 3D) et l'armature métallique (représentée par des éléments 1D), ce modèle améliore la description de la fissuration pendant la phase active de fissuration (début d'apparition de la fissure) et influence le comportement local de la structure, notamment autour de l'armature métallique. Un nouvel élément fini a ensuite été développé et implémenté dans le code des éléments finis. (Cast3M) en se concentrant sur le comportement tangentiel de la liaison.

Motivation de la recherche

Le comportement des structures en béton armé peut être extrêmement complexe dans le cas d'une représentation numérique du processus de fissuration. Les caractéristiques composites de la structure en béton armé doivent être finement présentées, en particulier à l'interface acier-béton. Une réflexion sur une méthodologie appropriée pour l'interface acier-béton est donc nécessaire pour les applications industrielles où les propriétés de fissuration sont très importantes. C'est particulièrement le cas pour les structures dont l'étanchéité est une fonctionnalité clé, car le taux de fuite potentiel est une fonction directe des propriétés de la fissure.

Les objectifs

L'objectif principal de cette recherche est de développer davantage la méthodologie qui a été développée précédemment pour être appliquée aux structures industrielles avec un coût de calcul acceptable et représentatif des mécanismes de glissement de liaison. Les objectifs généraux de l'étude peuvent être résumés comme suit :

- L'action des goujons est l'un des mécanismes de transfert des contraintes de cisaillement dans les structures en béton armé qui se produisent à l'endroit de la fissure. L'étude de ce phénomène avec le glissement de liaison peut être utile puisque le modèle proposé représente le comportement de fissuration de façon détaillée. Pour ce faire, il faut d'abord étudier le comportement directionnel normal du modèle de glissement d'adhérence. La validation correcte du modèle dans les directions normale et tangentielle est donc nécessaire.
- Le comportement irréversible du liant est implémenté dans le modèle bond-slip et testé avec un nombre limité d'applications par (Mang, 2016). Pourtant, l'application d'un modèle de glissement de liaison irréversible sur différents types d'essais numériques est nécessaire pour la validation complète du modèle.
- Dans la littérature, plusieurs auteurs comme (Hadi, 2008), (Karatas, et al., 2010), (Yang, et al., 2015) etc. ont souligné l'importance du confinement actif et passif sur les propriétés de liaison acier-béton par des études expérimentales et numériques. De plus, l'effet du confinement actif et passif sur la résistance d'adhérence est étudié par (Torre-Casanova, et al., 2012) avec une campagne expérimentale. Les auteurs (Torre-Casanova, et al., 2012) ont proposé des formulations empiriques pour déterminer le fendillement jusqu'à la rupture par arrachement (effet de confinement passif sur la résistance d'adhérence). L'étude de l'effet de pression externe (confinement actif) sur la liaison est donc nécessaire pour conclure cette étude.
- Afin de comprendre l'importance du modèle de glissement de liaison pour représenter numériquement l'action de la cheville, une comparaison appropriée est également nécessaire avec d'autres modèles de liaison (comme l'hypothèse de la liaison parfaite) en reproduisant différentes campagnes expérimentales. Cependant, avant d'effectuer ce genre d'analyse, il faut examiner attentivement les modèles appropriés pour l'acier et le béton afin de représenter le comportement au cisaillement des structures en béton armé.

Sur la base des objectifs présentés ci-dessus, les consentements généraux de cette thèse sont établis.

Méthodologie

Cette étude peut être résumée en quatre grands thèmes :

Le premier chapitre est consacré à l'état de l'art. L'interaction acier-béton dans les structures en béton armé est généralement expliquée et l'importance d'un comportement interfacial pour les propriétés des fissures est exprimée. Ensuite, la représentation numérique du lien acier-béton est présentée en définissant plusieurs modèles numériques existants. Une information de base est fournie sur les comportements des liaisons monotones et cycliques. Ensuite, l'influence du confinement sur le lien acier-béton est brièvement clarifiée pour différents types de confinement. Éventuellement, l'action de la cheville et son importance pour la résistance au cisaillement sont expliquées.

Le deuxième chapitre est consacré à l'introduction et à l'évaluation du modèle de glissement d'obligations existant. Tout d'abord, les anomalies détectées sont présentées, puis les nouvelles méthodologies adaptées sont expliquées pour surmonter les anomalies présentées. Par la suite, plusieurs tests numériques sont détaillés pour évaluer les méthodologies adoptées.

Le troisième chapitre est consacré à la mise en œuvre de l'effet de confinement à l'intérieur du modèle bond-slip. Dans un premier temps, les formules proposées sont décrites pour tenir compte de l'effet de confinement dans les propriétés de la liaison. Ensuite, l'implémentation de l'effet de confinement au modèle de glissement d'obligations est expliquée en détail. La mise en œuvre est validée par la reproduction de plusieurs campagnes expérimentales d'arrachage. Encore une fois, l'effet du confinement actif est étudié avec le nouveau modèle de glissement de liaison sur une bielle sous différents types de charges (monotone et cyclique).

Le quatrième chapitre est consacré à l'étude de l'action des chevilles dans les structures en béton armé avec le nouveau modèle de glissement par adhérence. Afin de représenter le comportement au cisaillement, deux campagnes expérimentales différentes (essais de poussée et essais de flexion) sont reproduites par différents modèles de liaison et de renforcement.

Chapitre-1 :

État de l'art

1. Introduction

Cette étude vise à améliorer l'intégration de la liaison acier-béton pour la modélisation des structures en béton armé. Dans le contexte, le modèle de glissement d'obligations existant (Casanova, et al., 2012) est d'abord étudié et ensuite amélioré en considérant différents phénomènes tels que le comportement transversal et irréversible des liaisons, l'action des goujons, l'effet de confinement, etc. Ce chapitre est créé pour donner des informations de base sur l'ensemble de l'étude avant d'entrer dans les détails de la mise en œuvre et de l'analyse liée au modèle de glissement obligatoire.

Ce chapitre met en lumière une information générale principalement dans quatre domaines :

- Interaction acier-béton : l'importance et l'effet de l'interface acier-béton dans les applications numériques et sa caractérisation sont expliqués.
- Représentation numérique du liant acier-béton : plusieurs modèles d'interface existants dans la littérature sont expliqués en se concentrant spécifiquement sur le comportement au glissement du liant.
- Loi de liaison acier-béton : le comportement de liaison monotone et irréversible (sous charges cycliques) de la liaison acier-béton est exposé. De plus, l'effet de confinement actif et passif et leur influence sur le comportement de l'adhérence acier-béton sont expliqués en détail.
- Action de cheville : le transfert de cisaillement dans les structures en béton armé est exploré principalement en se concentrant sur le phénomène de l'action de cheville. La caractérisation, la représentation analytique et numérique de l'action de la cheville sont expliquées en détail.

2. Conclusion

Le modèle bond-slip par (Casanova, et al., 2012) est une approche alternative pour représenter les effets du comportement de l'adhérence acier-béton dans les structures en béton armé associées à un modèle par éléments finis. Dans ce chapitre, certaines informations de pointe sont expliquées afin de mettre en évidence l'objectif de cette étude et la méthodologie suivie.

L'interaction acier-béton dans les structures en béton armé est généralement expliquée et l'importance du comportement de l'interface pour les propriétés de fissuration est exprimée. Ensuite, la représentation numérique de la liaison acier-béton est exprimée en définissant plusieurs modèles numériques existants, en se concentrant plus particulièrement sur le modèle de glissement de la liaison, par (Torre-Casanova, 2013). Une information de base est fournie sur les comportements des liaisons monotones et cycliques. Par la suite, l'influence du confinement sur le lien acier-béton est brièvement clarifiée pour différents types de confinement. Éventuellement, l'action de la cheville et son importance pour la résistance au cisaillement sont expliquées.

D'après les informations fournies dans ce chapitre, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Une évaluation détaillée du modèle de glissement de liaison est nécessaire pour utiliser le modèle dans les applications industrielles. En particulier, le comportement transversal et irréversible de la liaison doit être considéré avec soin pour représenter le comportement local et global des structures en béton armé (chapitre 2).
- De plus, la pression externe (confinement actif) est également un paramètre important qui affecte les caractéristiques de liaison. La prise en compte de l'effet de confinement actif dans le modèle du glissement de liaison peut améliorer la représentation factuelle du comportement structurel local et global (chapitre 3).
- L'action des goujons est un paramètre important pour le transfert de cisaillement, en particulier à l'endroit de la fissure. D'autre part, sa représentation numérique ou sa détection expérimentale sont assez gênantes puisque l'action de la cheville se produit avec d'autres composants de transfert. Pour comprendre l'importance de l'action de la cheville, il est nécessaire d'effectuer des études numériques approfondies. Ainsi, le modèle de glissement d'obligations par (Torre-Casanova, 2013) est un modèle efficace

pour saisir le comportement local (propriétés des fissures) et pourrait être utilisé pour étudier l'action des goujons dans les structures en béton armé (chapitre 4).

Chapitre 2 :

Élaboration du modèle du bordereau d'émission

1. Introduction

Ce chapitre est consacré aux développements du modèle de glissement obligatoire initialement proposé par (Casanova, et al., 2012) et (Mang, et al., 2015). Tout d'abord, un principe général du modèle de glissement obligatoire est présenté dans ce chapitre pour élucider la méthodologie du modèle. Par la suite, l'accent a été mis sur l'analyse du modèle et la localisation des lacunes, l'affinement par une solution, puis la validation de la nouvelle proposition. Généralement, les simulations comme les essais d'arrachement et les murs de cisaillement qui ont été réalisées par les auteurs mentionnés sont des géométries complexes. Comme de nombreux paramètres affectent le comportement de l'obligation, il est assez difficile d'analyser uniquement la contribution du modèle de glissement d'obligation dans les calculs numériques. Pour cette raison, des géométries assez simples comme un seul élément d'interface sont choisies pour comprendre l'acceptabilité et l'efficacité numérique du modèle bond-slip.

Principalement, deux anomalies majeures sont détectées en relation avec le comportement de liaison transversale et irréversible du modèle séparément. Après la détection de ces anomalies, différentes solutions sont proposées, testées et ensuite implémentées dans le code source. A savoir, une solution alternative est proposée afin d'obtenir le comportement transversal du liant et une méthodologie complètement nouvelle est proposée pour obtenir le comportement irréversible du liant acier-béton sous charge cyclique. Par la suite, les implémentations sont validées par plusieurs simulations sur des géométries simples. Comme le modèle de glissement de liaison est amélioré par plusieurs modifications, le comportement de liaison tangentielle est également validé avant d'effectuer toute autre analyse sur des géométries complexes.

2. Conclusion

L'évolution du modèle de glissement obligatoire est présentée dans ce chapitre. Antérieurement, le comportement transversal du modèle bond-slip est analysé. Les résultats ont révélé que les forces exercées sur les nœuds des éléments d'interface ne sont pas calculées avec précision. Par la suite, les codes sources sont revus pour détecter cette anomalie. Il a été découvert qu'il y a un inconvénient lié à l'intégration des forces entre les systèmes de coordonnées locales et globales. On a supposé que les forces directionnelles normales sur les nœuds des éléments d'interface étaient égales les unes aux autres dans le modèle initial de glissement de liaison. Cette hypothèse ne correspond pas à la réalité et provoque des résultats erronés dans les applications numériques. Les formulations appropriées pour l'intégration numérique sont implémentées dans les codes sources immédiatement après la détection de cette lacune. Les mêmes simulations sont effectuées une fois de plus sur l'élément d'interface pour voir les améliorations du modèle modifié. Les résultats obtenus avec le modèle de glissement de liaison modifié ont montré que les forces sur les nœuds des éléments d'interface sont calculées correctement. La précision des valeurs de force à la fin des calculs numériques est vérifiée avec une solution analytique très simple.

Cependant, un problème de convergence imprévu est observé pour ce modèle modifié, utilisant l'élément d'interface à l'intérieur d'un élément concret, même si les forces sont calculées correctement sur les nœuds des éléments d'interface. Après une analyse prudente des codes sources du modèle, on a pu déduire que ce problème était lié au transfert de contraintes entre l'interface et les nœuds des éléments concrets. Une solution alternative envisagée à ce stade était l'hypothèse d'une relation parfaite entre l'interface et le béton dans des directions normales. Cette méthodologie est à la fois adaptée à toutes les applications numériques postérieures avec le modèle bond-slip.

Par la suite, le comportement irréversible du modèle de glissement de liaison est analysé. Plusieurs essais numériques sont effectués sur l'élément d'interface simple sous charge cyclique. Différentes lois d'adhérence et différentes charges alternatives sont examinées dans ces simulations. La loi d'adhésion cyclique proposée par (Mang, 2016) convient à la loi d'adhérence pour le liant acier-béton proposée par l (Torre-Casanova, 2013) et il n'est pas applicable à une autre loi d'adhésion qui peut être définie par l'utilisateur. Une méthodologie complètement nouvelle est définie afin de représenter l'irréversibilité de l'interface qui n'inclut

pas le casse-tête du modèle précédent. Cette nouvelle méthodologie est mise en œuvre avec succès dans les pays de l (Cast3M) code des éléments finis. Le nouveau modèle irréversible est une approche générale capable d'adopter les applications du droit d'adhésion définies par l'utilisateur. Les forces de frottement du liant peuvent également être définies exclusivement par l'utilisateur et seront prises en compte pendant tout le processus numérique. Le comportement irréversible de l'interface est défini avec précision dans le nouveau modèle et validé par différents tests sur l'élément interface. Puisque le nouveau modèle vérifie et élimine les alternatives inappropriées afin de trouver le comportement irréversible authentique ; par rapport au modèle précédent qui vérifie toutes les probabilités une par une, le temps de calcul du nouveau modèle est réduit d'environ 16% par rapport à la version initiale pour les essais des éléments d'interface.

Enfin, le comportement tangentiel du nouveau modèle de glissement de liaison est testé sur une bielle d'ancrage par comparaison avec les résultats analytiques. Trois rigidités différentes (k_t) sont utilisées pour ce test. Les résultats numériques et analytiques sont identiques. A travers tous ces tests numériques présentés dans ce chapitre, le comportement tangentiel, transversal et irréversible du nouveau modèle de glissement de liaison est validé.

Chapitre 3 : Mise en œuvre de l'effet du confinement sur le comportement obligataire

1. Introduction

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le confinement actif a une influence sur le comportement de la liaison acier-béton ((Eligehausen, et al., 1983), (Malvar, 1991) etc.). Dans cette section, la mise en œuvre et la validation de l'effet de confinement actif sur le modèle de glissement sont expliquées en détail. De plus, l'effet du confinement actif sur le comportement structurel est étudié sur une bielle à l'aide du nouveau modèle de glissement de liaison.

2. Conclusion

Dans ce chapitre, la mise en œuvre et la validation de l'effet de confinement actif sur le nouveau modèle de glissement sont expliquées en détail.

Premièrement, la mise en œuvre de l'effet de confinement actif dans le modèle de glissement de liaison est présentée avec des formulations suggérées (Eq. 3.2 et 3.3). Par la suite, la méthodologie de mise en œuvre est testée sur un seul élément d'interface pour les cas de charge monotone et cyclique sous diverses pressions latérales. Les résultats ont montré que l'effet de confinement actif sur l'interface acier-béton est correctement appliqué dans le modèle de glissement de liaison.

Deuxièmement, quatre spécimens différents d'arrachements provenant de trois campagnes expérimentales différentes ((Xu, et al., 2012), (Torre-Casanova, et al., 2013) et (Shang, et al., 2017)) avec différentes longueurs d'encastrement, couvercles en béton, diamètres d'acier, pressions latérales, lois d'adhérence, propriétés des matériaux (acier et béton) et résistance d'adhérence (forte et faible) sont testés. Des résultats cohérents sont obtenus entre les simulations et les expériences pour les deux cas de test. Les formules de confinement actif mises en œuvre (Eq. 3.2 et 3.3) sont validées.

Enfin, le nouveau modèle de glissement de liaison est utilisé pour examiner l'effet du confinement actif sur le comportement structurel en effectuant une série d'analyses numériques sur une bielle. De plus, les résultats sont comparés à l'hypothèse d'adhérence parfaite pour les représentations en acier 1D afin de voir la signification du modèle. Le comportement local et global de la bielle sous diverses pressions latérales est comparé pour les cas de charge monotone et cyclique.

Pour le comportement global de la bielle, la chute de force ne peut pas être observée avec le modèle de liaison parfait. Cela n'est possible que pour le modèle bond-slip. Lorsque la compression latérale est augmentée, les gouttes deviennent plus lisses et le modèle de glissement de collage se rapproche du comportement de collage parfait. Ceci est dû à l'augmentation de la force d'adhérence due à la pression latérale. Aucune irréversibilité n'est observée avec l'hypothèse de liaison parfaite. Encore une fois, cela n'est possible qu'avec le nouveau modèle bond-slip.

Pour le comportement local de la bielle, des fissures discrètes sont observées dans les simulations du modèle de glissement de liaison par rapport aux simulations parfaites du modèle de liaison. De plus, la position des fissures peut être identifiée plus clairement à partir du glissement entre l'acier et le béton lorsqu'il change de signe. Un glissement moindre est observé à haute pression latérale en raison de l'augmentation de la force d'adhérence pour les cas monotones et cycliques. De plus, le nouveau modèle de glissement d'adhérence permet d'observer l'effet de confinement actif sur la fermeture de la fissure sous des charges alternatives. Il a été observé que l'augmentation de la compression latérale empêche la fermeture de la fissure.

En résumé, l'effet de confinement actif sur le comportement structurel global et local peut être correctement représenté pour les cas de charge monotone et cyclique lorsque le nouveau modèle de glissement de liaison est utilisé.

Chapitre 4 :

Enquête sur l'action des chevilles avec le nouveau modèle de glissement pour les structures en béton armé

1. Introduction

Dans ce chapitre, le comportement au cisaillement des structures en béton armé est étudié en se concentrant spécifiquement sur l'action des goujons. Comme mentionné dans le premier chapitre, l'action de la cheville n'est pas facile à présenter numériquement en raison de certaines difficultés et son effet sur le comportement structurel n'est pas clairement estimé dans la littérature. Une analyse numérique détaillée est nécessaire pour représenter l'action de la cheville.

L'objectif principal de cette section est d'évaluer les approches existantes de modélisation pour capturer l'action expérimentale des chevilles. Pour cette raison, différents modèles d'armatures (éléments de fermes et de poutres) et des modèles d'interface acier-béton (modèle à glissement de liaison et modèle à adhérence parfaite) sont comparés en reproduisant différentes campagnes expérimentales.

Tout d'abord, certaines considérations sont exposées à la modélisation des armatures d'acier liées aux phénomènes d'action des chevilles. Un processus d'étalonnage a été effectué sur le comportement non linéaire des éléments de la poutre. Deuxièmement, l'action de la cheville pure est étudiée à l'aide d'un test de poussée que l'on peut trouver dans la littérature ((Sagaseta, et al., 2011), (Xiao, et al., 2014), (Navarro-Gregori, et al., 2016) etc.). Sur la base de la campagne expérimentale, le nouveau modèle de glissement de liaison est comparé avec l'hypothèse de liaison parfaite et les résultats expérimentaux afin de déterminer l'efficacité du

modèle pour représenter le comportement local et global des structures renforcées. De plus, les représentations de la poutrelle 1D et de l'élément de poutrelle en acier sont comparées. Enfin, le comportement en cisaillement de structures relativement grandes comme les poutres profondes est étudié à l'aide du nouveau modèle de glissement de liaison. Encore une fois, une comparaison a été faite sur différents modèles de liaison et de renforcement pour capturer numériquement le comportement structural local et global expérimental.

2. Conclusion

Dans ce chapitre, le comportement au cisaillement des structures en béton armé est étudié en se concentrant sur l'action des chevilles. Les analyses par éléments finis sont effectuées à l'aide du modèle de glissement de liaison proposé pour l'interface acier-béton et comparées aux valeurs expérimentales. Les modèles de renforcement 1D (fermes et poutres) sont également examinés dans le cadre de cette étude. Les analyses numériques sont effectuées sur des poutres en L et des poutres continues profondes pour étudier l'action des goujons et le comportement total au cisaillement des structures en béton armé. Les conclusions suivantes peuvent être tirées.

Tout d'abord, le calibrage du modèle de renforcement est effectué avant d'étudier l'action de la cheville sur des structures relativement plus grandes. Les processus ont montré que la modélisation des éléments de poutre des barres d'acier donne des résultats cohérents par rapport à une approche multi-fibres si les distances appropriées sont définies pour le calcul de la plasticité en fonction du diamètre de la barre.

La densité du maillage influe sur la précision des résultats numériques de l'analyse de l'action des goujons. Comme l'action de la cheville se produit dans un espace très limité par rapport à l'espace, une densité de maille plus petite représente mieux ce comportement mécanique. La définition de nœuds explicites pour l'acier entre les deux côtés de la fissure peut représenter le comportement mécanique de la zone fissurée d'une manière plus appropriée. La densité du maillage a donc une importance vitale.

L'analyse numérique qui est effectuée sur les poutres en L révèle que l'action des goujons existe et peut être observée dans les simulations numériques en cas d'ouvertures de fissures importantes en utilisant uniquement une méthodologie existante correcte. D'une part, l'approche de l'élément de poutrelle sur l'armature n'est pas adéquate pour représenter le comportement mécanique des structures en béton armé sous charge de cisaillement après

l'apparition de l'action des chevilles. D'autre part, l'approche de l'élément de poutre sur l'armature donne des résultats pratiques par rapport aux résultats expérimentaux.

L'analyse numérique qui est effectuée sur des poutres profondes continues (échelle structurelle) révèle que les méthodes de calcul des fermes et des éléments de poutres fonctionnent bien jusqu'à ce que l'action des chevilles soit prise en compte. Toutes les simulations de faisceaux profonds ont des résultats cohérents avec l'expérience dans les premiers millimètres de déplacement. Il est possible d'aller plus loin dans l'itération de l'analyse numérique en utilisant l'approche par éléments de faisceau. La raison peut en être l'action de la cheville. L'élément en treillis ne peut pas représenter correctement le comportement mécanique du béton armé sous charge de cisaillement après l'ouverture d'une certaine quantité de fissures (là où l'action des chevilles se produit).

Enfin, le modèle de glissement d'adhérence représente le comportement global (relation force-déplacement) et le comportement local (configuration des fissures) des structures en béton armé sous charge de cisaillement mieux que le modèle d'hypothèse d'adhérence parfait.

Conclusion générale et perspectives

Un modèle de glissement d'obligations a d'abord été proposé par (Casanova, et al., 2012) pour représenter les effets du comportement de l'adhérence acier-béton dans les structures en béton armé associées à un modèle par éléments finis (Cast3M). Par la suite, cette méthode a été particulièrement adaptée à la simulation de " petites " structures comme une paroi simple par (Mang, et al., 2015). L'objectif de cette étude était d'améliorer le modèle initial de glissement obligatoire pour le rendre plus efficace et plus représentatif. La méthodologie adaptée peut être résumée comme dans la figure I.

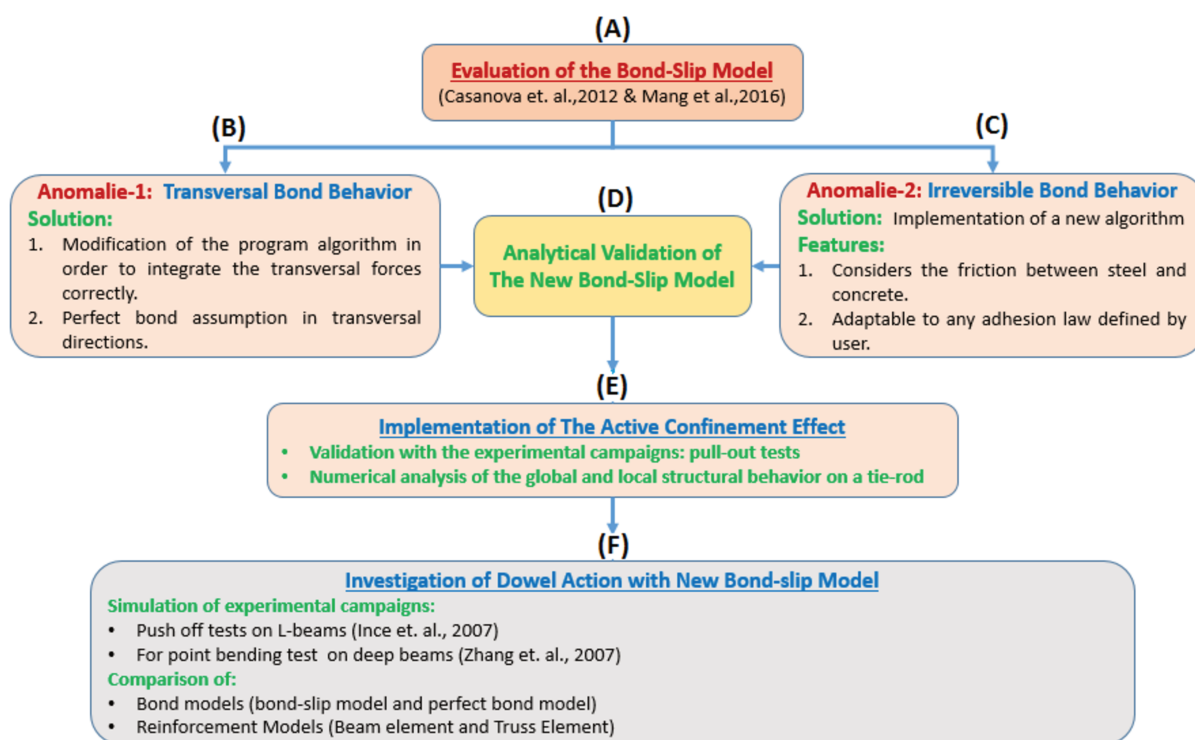


Figure I Méthodologie adaptée pendant l'étude.

La première étape consistait à évaluer le modèle de glissement initial (figure I.A). Après l'évaluation, deux anomalies majeures sont constatées dans le modèle :

- Mauvais calcul des forces transversales sur l'élément d'interface,
- Représentation insuffisante du comportement de liaison irréversible.

Tout d'abord, le comportement transversal du modèle bond-slip est étudié en effectuant plusieurs simulations. Des géométries simples comme un seul élément d'interface sont choisies pour les simulations afin de se concentrer uniquement sur le comportement de la liaison. Les

résultats de la simulation ont révélé que les forces sont mal calculées dans les directions normales de l'élément d'interface. Cette anomalie est réglée par la mise en œuvre d'une méthodologie de calcul adaptée au code source. D'autres simulations sont effectuées sur l'élément d'interface avec couverture en béton pour analyser la relation entre l'acier et le béton lorsque le modèle de glissement d'adhérence est utilisé. Encore une fois, une autre anomalie est détectée sur le transfert de contrainte entre deux matériaux (acier et béton). Une solution alternative est proposée pour ce problème qui suppose une relation parfaite dans les directions normales et calcule le glissement entre l'acier et le béton dans la direction tangentielle. Cette méthodologie permet d'utiliser le modèle de glissement de collage dans des applications numériques (figure I.B).

Deuxièmement, le comportement irréversible de la liaison acier-béton est étudié. Après une série de simulations sur un seul élément d'interface, il a été constaté que le modèle cyclique existant ne satisfait pas le comportement réel de l'adhérence sous des charges alternées lorsque différentes lois d'adhésion sont définies par l'utilisateur pour une interface acier-béton. Certes, le frottement entre les éléments en acier et en béton n'est pas pris en compte dans les calculs du modèle existant. Ensuite, un tout nouveau modèle de liaison irréversible est introduit afin de représenter correctement le comportement de la liaison. Ce nouveau modèle irréversible considère la friction entre l'acier et le béton. Il est également adaptable aux différentes lois d'adhésion qui peuvent être définies par l'utilisateur. Le nouveau modèle est testé sur un élément d'interface pour différentes contraintes de frottement, charges alternatives et lois d'adhésion (Figure I.C).

Après les modifications du modèle de glissement liées aux comportements des liaisons transversales et cycliques, une validation analytique a été effectuée sur le comportement tangentiel. Pour la validation, la solution analytique proposée par I (Casanova, et al., 2012) et (Mang, 2016) sont comparés à la solution numérique pour un essai à la bielle. Les résultats numériques s'avèrent cohérents par rapport aux résultats analytiques. Ainsi, plusieurs valeurs de rigidité sont testées pour l'interface sur le même scénario de test de tirants afin de déterminer les valeurs optimales pour les simulations du modèle de glissement de liaison. Les résultats de la simulation du modèle bond-slip avec différentes valeurs de rigidité sont également comparés avec le modèle de collage parfait. On a vu que si la rigidité de l'interface est suffisamment élevée pour les simulations du modèle bond-slip, on obtient les mêmes résultats que dans les

simulations parfaites du modèle bond. Le modèle modifié est validé dans le sens tangentiel (figure I.D).

Par la suite, l'effet de confinement sur les propriétés du liant est étudié. Après une analyse détaillée de la littérature, une formulation est proposée pour modifier la loi d'adhésion sous pression latérale. Les formulations sont implémentées correctement dans le modèle bond-slip. Ensuite, le nouveau modèle bond-slip est testé sur un seul élément d'interface pour des cas de charge monotone et alternative sous différentes pressions latérales. De plus, des valeurs de compression latérale et de tension constantes et croissantes sont testées sur l'élément d'interface unique. Les résultats ont montré que la modification de la loi sur les obligations fournissait correctement dans le modèle. Ainsi, le comportement d'adhérence irréversible sous pression externe est correctement représenté avec le nouveau modèle de glissement d'adhérence.

Par la suite, plusieurs essais expérimentaux d'arrachement sont effectués numériquement afin de valider le nouveau modèle de glissement de collage. Différentes longueurs d'encastrement, couvercles en béton, diamètres d'acier, pressions latérales, lois d'adhérence, propriétés des matériaux (acier et béton) et résistance d'adhérence (forte et faible) sont testés numériquement afin de valider le nouveau modèle d'adhérence et de glissement. Des résultats cohérents sont obtenus entre les simulations et les expériences pour les deux cas de test. Les formules de confinement actif mises en œuvre sont validées.

Plus tard, le nouveau modèle de glissement de liaison est utilisé pour examiner l'effet du confinement actif sur le comportement structural en effectuant une série d'analyses numériques sur une bielle pour une charge monotone et alternative. De plus, les résultats sont comparés à l'hypothèse d'adhérence parfaite pour les représentations 1D et 3D en acier afin de voir la signification du modèle. Selon les résultats, des baisses de force sont observées dans la courbe force-déplacement avec les simulations du modèle de glissement d'adhérence au moment de l'apparition des fissures, alors qu'elles ne sont pas visibles avec les autres simulations. Dans les simulations de modèle de glissement de liaison, les dommages sont relativement plus concentrés sur l'emplacement des fissures. Ainsi, la position des fissures peut être plus clairement identifiée à partir du glissement entre l'acier et le béton lorsqu'il change son signe. Un glissement moindre est observé pour l'augmentation de la pression latérale en raison de l'augmentation de la force d'adhérence pour les cas monotones et cycliques. De plus, le nouveau modèle de glissement d'adhérence permet d'observer l'effet de confinement actif sur la fermeture de la fissure sous des charges alternatives. L'effet de confinement actif sur les

structures en béton armé à travers l'interface acier-béton peut être observé pour les cas de charges monotones et cycliques lorsque le nouveau modèle de glissement d'adhérence est utilisé (Figure I.E).

Dans la dernière étape, le comportement au cisaillement des structures en béton armé est étudié avec le nouveau modèle de glissement d'adhérence qui se concentre spécifiquement sur le phénomène d'action des goujons. Les campagnes expérimentales d'un essai de poussée et d'un essai de flexion en quatre points sont reproduites avec le modèle de glissement de liaison et le modèle de liaison parfait. Deux types de représentations d'armatures sont utilisés dans l'analyse numérique (poutrelle et élément de poutre).

D'après l'analyse numérique effectuée sur les poutres en forme de L (essais de poussée), les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Le modèle initial de glissement d'adhérence n'a été utilisé qu'avec l'acier à éléments en treillis lors de l'analyse numérique précédente de l (Torre-Casanova, 2013) et (Mang, 2016). Dans le cadre de cette étude, le nouveau modèle de glissement d'adhérence est utilisé avec succès pour la représentation de l'élément de poutre en acier.
- L'action de cheville existe et peut être représentée numériquement lorsque le modèle de renforcement approprié est utilisé (élément de poutre).
- La densité du maillage du béton influe sur la précision des résultats numériques pour l'analyse de l'action des goujons. Comme l'action de la cheville se produit dans un espace très limité par rapport à l'ensemble de la géométrie après l'ouverture de la fissure, une densité de maille plus faible représente mieux le comportement mécanique de la zone. La définition de nœuds explicites pour l'acier entre les deux côtés d'une fissure peut représenter le comportement mécanique de la zone fissurée d'une manière plus appropriée.
- La représentation de l'acier de l'élément de charpente ne reproduit pas correctement le comportement mécanique du béton armé sous charge de cisaillement après l'ouverture d'une certaine quantité de fissures (là où l'action des goujons se produit). En effet, il a été conclu que l'approche de l'élément de poutrelle n'est pas adéquate pour représenter le comportement de l'action pure de la cheville puisqu'elle ne tient pas compte de la flexion de la barre d'acier.

- L'approche de l'élément de poutre sur l'armature donne des résultats pratiques comparés à ceux des éléments de poutrelles. Il est nécessaire d'utiliser l'approche par éléments de poutre dans les applications numériques pour représenter l'action pure de la cheville.

D'après l'analyse numérique effectuée sur les poutres continues profondes (essais de flexion en quatre points), les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Une fissure de cisaillement prématurée est observée pour des simulations d'adhérence parfaites comparées aux résultats expérimentaux.
- Après l'apparition de la fissure de cisaillement, seule la simulation du modèle de glissement de liaison peut reproduire les observations expérimentales à l'échelle globale et locale. Ceci peut être dû au relâchement des contraintes dues au glissement entre l'acier et le béton. Le nouveau modèle bond-slip permet de capturer avec succès le comportement de pré-crête sous charge de cisaillement.
- L'utilisation d'un élément de poutre est encore nécessaire pour la représentation correcte du comportement au cisaillement. Même avec les simulations du modèle de glissement d'adhérence, on observe moins de glissement pour la représentation de l'élément de poutrelle que pour la représentation de l'élément de poutre.

Dans les deux analyses numériques, une dépendance extrême est observée sur les conditions initiales des noms de domaine en :

- Densité des mailles,
- Modèle d'endommagement du béton,
- Propriétés de symétrie,
- Emplacement de la force appliquée,
- Méthodologie de blocage des supports,
- Propriétés matérielles de l'acier et du béton,
- La disposition des armatures et des supports.

En résumé, on peut conclure que le nouveau modèle d'adhérence-glissement représente mieux le comportement global (relation force-déplacement) et local (configuration des fissures) des structures en béton armé sous charge de cisaillement que le modèle d'hypothèse d'adhésion parfaite (figure I.F).

Même si le modèle développé semble produire des résultats appropriés, il faudra peut-être approfondir plusieurs points pour améliorer le modèle actuel :

- Une étude plus approfondie du comportement normal de l'interface directionnelle pourrait être utile pour capter le comportement post-crête des structures en béton armé afin de représenter l'action pure des goujons dans le modèle.
- Le nouveau modèle de glissement de liaison irréversible mis en œuvre est testé pour des simulations à l'échelle du laboratoire (Tie-rod). L'application du modèle est donc nécessaire pour les simulations à l'échelle industrielle afin d'évaluer l'efficacité du modèle et son effet sur le comportement structurel local et global des charges cycliques.
- Dans cette phase, l'effet du confinement sur les propriétés de liaison peut être observé de façon réaliste. D'autre part, l'effet sur le comportement structurel global n'est pas extrêmement significatif selon les tests numériques effectués. Une analyse plus poussée peut être nécessaire en comparant différents types de campagnes expérimentales pour clarifier l'effet du confinement sur le comportement structurel global.
- Le revêtement en béton est pris en compte pour l'effet de confinement actif sur le comportement d'adhérence dans le nouveau modèle de glissement d'adhérence. D'autre part, la prise en compte du confinement passif lui-même pour les barres nervurées à l'intérieur du modèle pourrait être utile pour capturer l'ensemble du comportement du confinement (actif et passif).
- Le nouveau modèle à glissement d'adhérence donne des résultats pratiques en accord avec les modèles en treillis et les modèles en acier à éléments de poutre. Il peut être utile de modifier le modèle pour pouvoir l'utiliser sur la représentation 3D de l'acier.
- D'autres simulations à grande échelle sont encore nécessaires pour généraliser complètement le modèle à des applications industrielles réelles.

