



## AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : [ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr](mailto:ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr)

## LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

[http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg\\_droi.php](http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php)

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

# RESUME

Les ponts sont des structures destinées au franchissement des obstacles et ayant généralement une portée plus large que ces obstacles. Ils jouent un rôle clé dans le trafic terrestre. Avec l'accroissement rapide de l'économie, la conception des ponts a vu un développement sans précédent. Plus de 850000 viaducs autoroutiers et 10000 km des ponts pour la voie ferré à grande vitesse ont été construits en Chine jusqu'à 2018. Les ponts en béton armé peuvent être divisés en ponts en béton armé (RC) et en béton précontraint (PC). L'étude statistique montre que plus de 70% des ponts sont construits sous forme de ponts PC en Europe et en Amérique. En Chine, plus de 75% des ponts sont construits sous forme de ponts PC.

Le béton précontraint est largement utilisé dans la construction des ponts. Cependant, vu les échanges de masse avec l'environnement (eau, CO<sub>2</sub> et autres agents chimiques ...), les armatures de précontrainte ont tendance à se corroder. Comme le produit corrodé a un volume plus important que le matériau sain, la corrosion peut provoquer des fissurations dans les enrobages en béton, et par conséquent, la dégradation de la structure et sa capacité de la résistance. La sécurité et la durabilité de la structure sont alors menacées. Cette étude a été menée pour bien comprendre et bien maîtriser cette pathologie dans les structures en béton précontraint. On étudiera la capacité de résistance de poutres en béton précontraint en prenant en compte l'influence de la corrosion. Ce mémoire est composé de 6 chapitres.

**Dans le premier chapitre**, tout d'abord, le contexte et la signification de cette thèse sont présentés. Ensuite, une étude bibliographie est menée sur la morphologie de la corrosion des torons, la fissuration induite par la corrosion, l'adhérence des torons corrodés et la capacité de flexion des poutres PC corrodées. Les lacunes des recherches existantes dans les domaines précédents sont discutées. Par la suite les principaux contenus de recherche de cette étude sont présentés.

**Puis, dans le chapitre deux, la relation entre l'ouverture des fissures et le taux de remplissage du produit corrodé dans les fissures a été établie par une approche**

### **expérimentale, notamment par l'essai de corrosion accélérée.**

La quantité de produits de corrosion pénétrant dans les fissures, en tant que contenu de recherche important de la fissuration du béton armé, a également attiré l'attention. Dans les études précédentes, certains chercheurs considéraient que les produits de corrosion remplissaient complètement les fissures avant la fissuration de l'enrobage. Certaines études ont révélé que les produits de corrosion présentaient une répartition spatiale non uniforme et ne remplissaient pas les fissures dans le béton. Des chercheurs ont signalé que les fissures ne seraient pas complètement remplies par les produits de corrosion. Ces études portent sur le remplissage des produits de corrosion avant la fissuration de l'enrobage. Après la fissuration de l'enrobage, les fissures se remplissaient progressivement de produits de corrosion au fil du temps. Le remplissage des produits de corrosion dépend de nombreux paramètres, tels que le degré de corrosion, le type d'acier et l'enrobage. La manière de quantifier le remplissage des produits de corrosion est encore sujet à discussion.

Pour étudier l'étendue du remplissage des produits de corrosion des torons dans le béton fissuré, douze échantillons ont été conçus avec une section transversale carrée de 150 mm × 150 mm et de 1200 mm de longueur. Les échantillons ont été divisés en deux groupes: le groupe S (sans les armatures transversales) et le groupe RS (avec les armatures transversales). Chaque groupe se compose de six poutres. La méthode de corrosion accélérée artificiellement a été utilisée pour obtenir différentes largeurs de fissure dans les poutres. Pour clarifier de manière indépendante l'effet de la corrosion des torons sur la fissuration du béton, les armatures ont été protégées avec de la résine époxy pour empêcher de la corrosion. Le courant de corrosion dans l'ensemble du processus a été contrôlé à une constante de 0.3 A.

L'effet des armatures transversales sur la fissuration induite par la corrosion a été étudié par des essais de corrosion accéléré. La morphologie de la corrosion du câble est observée après le test. Exceptée la corrosion électrochimique, la corrosion crevasse et la corrosion sous contrainte se produisent également dans le toron précontrainte. La corrosion crevasse dans le toron entraînerait une vitesse de corrosion plus rapide que celle dans les armatures. Un câble corrodé sous une contrainte élevée

peut provoquer une rupture fragile sans avertissement, ce qui est un mode de défaillance extrêmement dangereux.

Le remplissage des produits de corrosion des torons lors de la fissuration du béton est étudié. Les effets des armatures transversales sur le remplissage des produits de corrosion et la fissuration du béton sont clarifiés. Les résultats expérimentaux montrent que le taux de remplissage du produit de corrosion a un fort lien avec l'ouverture de la fissure, jusqu'à une valeur critique. Lorsque l'armature transversale est utilisée, l'ouverture critique diminue de 20% par rapport au cas sans armature transversale.

Les armatures transversales présentent un effet de retenue significatif sur la fissuration et l'angle des fissures. En prenant par exemple 3% de perte de corrosion, la largeur de la fissure diminue de 27% en utilisant des armatures transversales. Un modèle empirique pour estimer la largeur de fissure est développé en se basant sur la proportion de remplissage des produits de corrosion et la forme lors de la torsion du toron. Le modèle proposé a été validé par des données expérimentales.

Cette équation empirique est validée par des données expérimentales. Le modèle proposé peut prévoir avec une certaine fiabilité la largeur de fissure induite par la corrosion. Les fissures induites par la corrosion sont sensibles au développement du remplissage de la rouille. Pour cette raison, le modèle prend en compte l'effet de remplissage des produits de corrosion.

**Ensuite, dans le chapitre trois, l'influence du niveau de précontrainte sur l'ouverture de fissuration est étudiée à la fois par des approches expérimentales et analytiques.**

Un nombre considérable d'études ont été effectuées sur la fissuration induite par la corrosion des structures en béton armé. Cependant, peu d'études ont réalisés sur la fissuration affectée par la corrosion dans les structures en béton précontraint. Pour les structures en PC, la vitesse de corrosion des torons sous fortes contraintes est souvent plus rapide que celle des armatures en acier. De plus, la forme torsadée du toron entraîne des corrosions sous forme de trous et de crevasses. Cette forme rend l'accumulation et le développement de produits de corrosion plus complexes. Le

mécanisme de la fissuration induite par la corrosion dans le béton précontraint n'est pas encore clair et doit être étudié plus profondément.

On présentera d'abord les essais de corrosion accélérée sur des poutres avec différents niveaux de précontrainte. Douze poutres en béton précontraint ont été conçues avec une section rectangulaire de 130 mm × 150 mm et de 2000 mm de longueur, comprenant huit poutres en pré-tension et quatre poutres en béton post-tension. La différence entre la fissuration induite par la corrosion du béton pré-tension et celle du béton post-tension est présentée. La corrosion des torons dans les poutres en pré-tension peut induire plus facilement la fissuration du béton par rapport celle des poutres en béton post-tension. Pour les poutres en béton post-tension, le coulis est utilisé pour remplir le conduit. L'utilisation de coulis fait que le revêtement en béton devient un matériau non continu, qui contient du coulis à l'intérieur et du béton à l'extérieur. Pour cette raison, la largeur de fissure dans les poutres en béton post-tension est plus petite par rapport à celle des poutres en béton pré-tension au même temps de corrosion.

Le taux d'expansion des produits de corrosion des câbles est mesuré par la spectroscopie infrarouge et la gravimétrie thermique. La précontrainte peut augmenter la proportion d'oxyde de fer et diminuer la proportion d'hydroxyde de fer dans les produits de corrosion. Ces changements ont une légère influence sur le taux d'expansion. Le taux d'expansion de la rouille des câbles sous les conditions de corrosion accélérées électro-chimique est proposé à 2,78.

Les effets de la précontrainte sur le temps critique de fissuration de l'enrobage et la largeur des fissures sont clarifiés sur la base des résultats expérimentaux. Les résultats montrent que la précontrainte peut accélérer le processus de fissuration induit par la corrosion. En faisant varier la précontrainte de 0 à 75% de la résistance d'armature, le temps correspondant à l'amorçage de fissuration diminue de 22% et le taux de propagation de la fissure augmente de 9%.

Les modèles analytiques basés sur la mécanique de la rupture sont proposés pour estimer la fissuration induite par la corrosion du toron dans les structures en béton précontraint. Ces modèles prennent en compte le niveau de la précontrainte et les

géométries du toron. Un facteur de réduction est utilisé pour tenir compte de la précontrainte résiduelle dans le béton fissuré. Le modèle analytique est validé par les résultats expérimentaux. Puis un modèle analytique prenant en compte les effets couplés de la précontrainte et de la corrosion des armatures, est proposé pour prédire le processus global de fissuration de l'enrobage.

**Dans le chapitre quatre, un modèle est proposé pour prédire la perte de précontrainte à cause de la corrosion dans les poutres en béton précontraint.**

Le béton précontraint a été largement utilisé en Génie Civil en raison de ses performances supérieures et de sa durabilité élevée. Néanmoins, à cause de certaines défaillances récentes des structures en béton précontraint, les problèmes de préoccupations ont attiré attention surtout pour les structures déjà existantes. La corrosion des torons est l'une des principales causes de la détérioration des structures en béton précontraint. La corrosion peut réduire la section effective des torons et l'adhérence toron-béton, induire la fissuration du béton, entraîner une perte de précontrainte et éventuellement détériorer la résistance des structures. Pour les structures en béton précontrainte, la précontrainte effective est particulièrement importante. Donc, l'évaluation de la perte de précontrainte est nécessaire pour garantir le bon fonctionnement et la sécurité des structures existantes.

L'expansion de la corrosion des torons peut entraîner une perte de précontrainte. Un nouveau modèle est proposé pour prédire la perte de précontrainte à cause de la corrosion dans les poutres en béton précontraint. Le couplage de la fissuration du béton et de la détérioration de l'adhérence est considéré dans le modèle. La fissuration induite par la corrosion est estimée en tenant compte des comportements de ramollissement du béton fissuré. La force d'adhérence du toron corrodé est évaluée à partir de la contrainte d'adhésion, du confinement et de la pression expansive. La perte de précontrainte dans le câble corrodé pourrait être calculée sur la base de la compatibilité de déformation et des équations d'équilibre de force.

La chute de précontrainte dans les poutres et la résistance mécanique ont un fort lien avec la corrosion. Lorsque le niveau de corrosion est inférieur à 6,6%, il n'y a pas de perte de résistance significative. Puis, avec l'augmentation du taux de corrosion, la

résistance des liaisons béton-armature et la précontrainte effective diminuent progressivement, jusqu'à zéro lorsque le niveau de corrosion atteint 34%.

Des essais de flexion à quatre points ont été réalisés sur huit poutres en béton précontraint sous différents niveaux de précontrainte, avec des armatures corrodées. Les résultats expérimentaux sont utilisés pour valider le modèle proposé. Une précontrainte élevée du toron peut accélérer la perte de précontrainte induite par la corrosion. En faisant varier le niveau de précontrainte du toron de 25% à 75% de la résistance à la traction du toron, la perte de précontrainte induite par la corrosion augmente de 20,1% d'après cette étude expérimentale.

**Finalement, dans le cinquième chapitre, un modèle analytique pour prédire la résistance en flexion de poutres en béton précontraint corrodées a été proposé.**

La corrosion de l'acier dans le béton a été considérée comme l'une des principales causes de détérioration structurelle. En raison de la haute précontrainte appliquée, le danger potentiel de corrosion dans les poutres en béton précontraint serait beaucoup plus grave que celui des éléments en béton armé. L'effondrement des structures en béton précontraint corrodées présente généralement une rupture fragile sans avertissement, ce qui entraînerait des pertes économiques substantielles. L'effet de la corrosion des torons sur la résistance de flexion doit être étudié de manière approfondie pour assurer le fonctionnement et la sécurité des poutres PC corrodées.

Afin de prédire la capacité en flexion, les effets de la réduction de la section des torons et de la détérioration du matériau peuvent être facilement incorporés dans le modèle avec la perte de corrosion et la loi de comportement dégradée. La prise en compte des effets de la fissuration induite par la corrosion et de la dégradation de l'adhérence reste un problème compliqué. De plus, l'effet des fissures en flexion n'a pas été pris en compte dans le modèle. Dans cette étude, un modèle analytique, incorporant ces effets multifactoriels, est proposé pour prédire la capacité de flexion des poutres PC corrodés.

Dans ce modèle, la réduction de la section d'armature, la détérioration des matériaux, la fissuration du béton et la dégradation des liaisons entre béton et armature ont été pris en compte. Le modèle proposé est validé par les résultats expérimentaux. A

partir de 5,5%, la résistance en flexion a été fortement perturbée par la corrosion d'armature. Le dernier chapitre présente les conclusions générales et les perspectives.

**Mots clés : Ponts ; Poutres en béton précontraint ; Corrosion ; Fissuration ; Chute de précontrainte ; Résistance en flexion**