



Comportement des structures en béton armé existantes - cas de la corrosion des armatures

Benjamin Richard

► To cite this version:

Benjamin Richard. Comportement des structures en béton armé existantes - cas de la corrosion des armatures. Techniques de l'ingénieur: Génie du Nucléaire, 2020, nc, 10.51257/a-v1-c6153 . hal-03710699

HAL Id: hal-03710699

<https://hal.science/hal-03710699>

Submitted on 30 Jun 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Comportement des structures en béton armé existantes

Corrosion des armatures

Behavior of reinforced concrete structures
Corrosion of rebars

par **Dr Benjamin RICHARD, HDR, Ing.**

Chef du Laboratoire de Modélisation et d'Analyse de la Performance des Structures

Président du Comité Scientifique et Technique de l'Association Française de Génie Parasismique

IRSN, 31 avenue du Général Leclerc, F-92260, Fontenay aux Roses, France

Résumé :

Après la seconde guerre mondiale, un grand besoin d'infrastructures est apparu. Face au défi de la reconstruction, les pouvoirs publics se sont tournés vers les architectes et ingénieurs qui ont dû apporter des réponses rapides qui, parfois, n'ont pas intégré les aspects liés à la durabilité. Toutefois, les gestionnaires d'ouvrage en béton armé ont fait état de dégradations causées par la corrosion des armatures. Cet article, rappelle d'abord les fondements du phénomène de corrosion des armatures. Ensuite, les principales voies de calcul permettant de prendre en compte ce phénomène dans les modèles mécaniques sont présentées. Enfin, un cas d'application permet de mettre l'accent sur certains points d'attention.

Abstract:

A loss of infrastructures appeared during the post second war period. To face this issue, public authorities asked civil engineering to new ones with a non-flexible time constraint. That is why civil engineers have sometimes answered without taking into account sustainability aspects in the design stage. Nowadays, many stakeholders report degradations caused by corrosion of the rebars. In this paper, the basis of this phenomenon are first described. Then, the main simulation strategies to account for corrosion in the mechanical model are presented. Finally, an illustrative structural case study shows some specific aspects on which attention should be paid.

Mots-clés : corrosion, modèles numériques, interface entre l'acier et le béton

Keywords: corrosion, numerical models, steel/concrete interface

Table des matières

1	<i>Phénoménologie liée au développement de la corrosion et conséquences mécaniques</i>	4
1.1	Mécanismes physico-chimiques	4
1.1.1	Généralités	4
1.1.2	Cas de la corrosion par carbonatation	5
1.1.3	Cas de la corrosion par pénétration des chlorures	6
1.2	Conséquences mécaniques à l'échelle locale	6
1.2.1	Dégradation de l'acier	6
1.2.2	Variation des propriétés d'adhérence entre l'acier et le béton	7
1.3	Conséquences mécaniques à l'échelle structurale	8
1.3.1	Comportement en service	8
1.3.2	Comportement ultime	9
2	<i>Stratégies numériques de modélisation</i>	11
2.1	Généralité	11
2.1.1	Approches analytiques	11
2.1.2	Approches numériques	11
2.1.3	Synthèse	12
2.2	Approche 0D	13
2.2.1	Principe	13
2.2.2	Conséquence mécanique locale	13
2.2.3	Conséquence mécanique structurale	15
2.3	Approche 1D	16
2.3.1	Principe	16
2.3.2	Conséquence mécanique locale	16
2.3.3	Conséquence mécanique structurale	20
2.4	Approche 2D (3D)	22
2.4.1	Principe	22
2.4.2	Conséquence mécanique locale	23
2.4.3	Conséquence mécanique structurale	26
3	<i>Application structurale : poutre soumise à un chargement de flexion quatre points</i>	29
3.1	Description du protocole expérimental	29
3.2	Description de la modélisation numérique	30
3.3	Résultats	31
3.3.1	Approche 1D	31
3.3.2	Approche 2D/3D	32
4	Conclusion	38
5	Glossaire	39
6	Sigles, notations et symboles	40

Introduction

Après la seconde guerre mondiale, un grand besoin d'infrastructures est apparu. Face au défi de la reconstruction, les pouvoirs publics se sont tournés vers les architectes et ingénieurs en génie civil qui ont dû apporter des réponses rapides. Dans ce contexte, les réponses apportées n'ont parfois pas pleinement intégré les notions de durabilité des ouvrages de génie civil. Aujourd'hui, l'ensemble de ces infrastructures constitue un héritage et un patrimoine dont les fonctionnalités en service doivent être maintenues.

À titre d'exemple, on peut mentionner les ouvrages d'art ou encore les ponts rails utilisés par l'ensemble des usagers des réseaux routier et ferroviaire. Or, les gestionnaires d'ouvrages ont fait état d'importants signes d'endommagement causés par l'interaction entre l'environnement extérieur et les matériaux constitutifs des ouvrages existants. Leur durabilité en est nettement affectée, pouvant conduire parfois à une perte d'aptitude au service, voire jusqu'à une perte de sécurité structurale. Une des causes majeures responsables de cette perte de performance a été identifiée comme étant la corrosion des armatures présentes dans le béton armé. Ce phénomène est susceptible de se développer soit par carbonatation, soit par pénétration des ions chlorures dans le béton d'enrobage. C'est alors que des produits de corrosion, encore appelés rouille, apparaissent. Leur formation puis leur expansion génèrent des contraintes de traction qui, dès que la résistance en traction du béton est dépassée, entraînent l'apparition de fissures. D'un point de vue pratique, dès que les premières fissures sont remarquées à la surface du béton, la corrosion a généralement atteint un stade avancé et des actions de maintenance correctives doivent être lancées. Cela occasionne des coûts importants.

Ainsi, l'évolution des conséquences mécaniques associée au développement de la corrosion des armatures du béton armé se pose dans le cas des ouvrages existants. De plus, si l'on se réfère au retour d'expérience acquis depuis les années 50, pour les ouvrages neufs, quelle que soit leur nature, ce point doit être pris en compte (conception, surveillance en service, maintenance). Apporter des éléments de réponse en vue d'anticiper au mieux les conséquences de cette pathologie présente donc des enjeux importants. Pour cela, de nombreux travaux ont été réalisés au sein des communautés scientifiques nationales et internationales. Ces travaux ont pour objectifs d'abord de comprendre les mécanismes physico-chimiques responsables de l'apparition et du développement de la corrosion des armatures dans le béton armé et ensuite de proposer des stratégies de modélisation pour décrire et prédire les conséquences mécaniques de ce phénomène. Ainsi, des outils de modélisation et de description permettant (i), d'une part, de prendre en compte l'état vieilli dans un modèle numérique et (ii), d'autre part, d'évaluer les fonctions de performance caractéristiques des états limites en service ou ultimes ont fait l'objet de nombreux développements.

Cet article vise à présenter des éléments de connaissance relatifs à l'évaluation du comportement d'éléments de structure en béton armé en présence de corrosion des armatures. En premier lieu, les principaux mécanismes responsables de l'initiation et du développement du phénomène de corrosion des armatures sont rappelés. Comprendre avec précision ces phénomènes est nécessaire non seulement pour élaborer des stratégies correctives, mais aussi pour être en mesure d'en tenir compte lors de l'évaluation de la durée de vie des ouvrages concernés. En particulier, une attention spécifique sera apportée à l'identification des conséquences mécaniques du phénomène de corrosion, aussi bien à l'échelle locale qu'à l'échelle de la structure. Les premiers signes à l'échelle locale peuvent parfois permettre au gestionnaire d'ouvrages de mettre en place des stratégies de maintenance corrective légères,

évitant ainsi des interventions plus lourdes susceptibles d'engendrer la mise hors service temporaire d'un ouvrage. En second lieu, les principales stratégies de modélisation existantes sont présentées : des plus simplifiées aux plus sophistiquées. À ce stade, seul le cas des ouvrages existants est considéré, le principal objectif des approches de modélisation étant l'évaluation des marges à un instant donné. Les cadres d'application de chacune des approches de modélisation sont explicités et les apports et les lacunes de chacune d'entre elles sont exposés. Pour terminer, un exemple d'évaluation structurale est proposé à l'aide de deux approches distinctes.

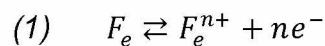
1 Phénoménologie liée au développement de la corrosion et conséquences mécaniques

La corrosion des armatures du béton armé s'initie et se développe dès que certaines conditions favorables sont réunies. On omet ici la phase d'initiation qui est fort variable notamment en durée et est fonction de la qualité de l'enrobage des armatures ainsi que de l'agressivité du milieu. Pendant la phase de développement de la corrosion et après une certaine durée, les propriétés mécaniques du béton armé s'en trouvent modifiées. Ces modifications interviennent dans un premier temps à une petite échelle, caractérisée par une dimension voisine du centimètre. Plus le développement du phénomène se poursuit, plus les conséquences mécaniques ont tendance à altérer l'ouvrage dans sa globalité, à une échelle caractérisée par une dimension de l'ordre du mètre.

1.1 Mécanismes physico-chimiques

1.1.1 Généralités

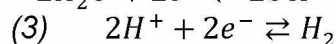
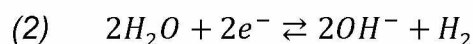
Le phénomène de corrosion est de nature électrochimique [COR407], [C6151]. Il s'agit d'une attaque irréversible d'un acier au carbone. Plusieurs réactions s'effectuent à la surface du métal. Plus précisément, on distingue généralement deux réactions primaires (anodique et cathodique) et une réaction secondaire. Lors de la réaction anodique, le métal s'oxyde. L'ion métallique quitte le réseau cristallin solide et passe en solution. Ainsi, pour le fer, la réaction anodique s'écrit de la manière suivante :



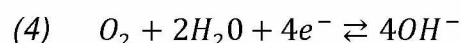
où F_e est le fer, n est un entier et e^- représente un électron. Dans l'équation (1), n est un entier qui dépend du type d'oxyde de fer formé. De manière concomitante à la première, une réaction cathodique s'effectue également.

Selon l'environnement et la quantité d'oxygène à la cathode, deux types de réaction sont susceptibles d'apparaître :

En l'absence d'oxygène :

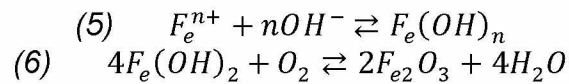


En présence d'oxygène :



Enfin, en plus des réactions primaires qui viennent d'être présentées, une réaction secondaire s'effectue. Cette dernière se traduit par l'apparition d'un dépôt à la surface

du métal. De manière simplifiée, les équations bilans s'écrivent comme suit :



Pour un élément de structure en béton armé, on considère qu'une solution interstitielle est présente dans les pores du béton. Son pH est classiquement pris supérieur à 12,5 selon [1]. L'acier des armatures est alors recouvert d'un film passif constitué de magnétite ou d'hématite, d'après le diagramme de Pourbaix et selon le pouvoir oxydant. La nature exacte de ce film est grandement influencée par le pH de la solution interstitielle, comme le montrent les travaux de [2] et de [3]. Lorsque ce film est déposé sur l'armature, on parle de passivation de l'armature.

Dès lors que l'élément de structure en béton armé est sujet à une agression extérieure, comme par exemple la pénétration de dioxyde de carbone ou d'ions chlorures, le film protecteur tend à disparaître. On parle alors de **dépassivation de l'armature**.

Cette dépassivation peut être plus ou moins uniforme le long de l'armature selon le type d'agents agressifs. On distingue classiquement le cas d'une corrosion par carbonatation (pénétration de dioxyde de carbone) et le cas d'une corrosion par chlorures (pénétration des ions chlorures).

Pour un élément de béton armé dont la formulation du béton respecte la pratique, sa perméabilité sera globalement homogène. Lorsque cet élément est plongé dans l'air ambiant, le dioxyde de carbone peut progressivement pénétrer le béton et atteindre l'armature et ce, de manière plutôt homogène. C'est pourquoi la corrosion par carbonatation tend à être homogène le long d'une armature. En revanche, à la différence du CO₂ atmosphérique, les ions chlorures sont généralement accompagnés d'eau (eau de pluie et sel de déverglaçage par exemple) susceptible de s'accumuler davantage dans certaines zones. Le processus de diffusion des ions chlorures en solution aqueuse est également différent de celui du CO₂ atmosphérique. C'est pourquoi les ions chlorure ont tendance à conduire à une corrosion localisée.

1.1.2 Cas de la corrosion par carbonatation

Le phénomène de carbonatation est le résultat de la réaction de neutralisation des bases présentes dans le ciment hydraté par le CO₂ atmosphérique qui diffuse dans le béton sous forme gazeuse, se dissout dans la solution interstitielle et réagit avec les hydrates pour former des carbonates de calcium CaCO₃. Cette réaction réduit le pH de la solution interstitielle à une valeur inférieure à 9 ce qui dépasse les aciers. La dépassivation des aciers augmente leur corrosion. L'air présent dans le milieu extérieur contient un pourcentage de dioxyde de carbone voisin de 0,03 %. Cette teneur moyenne dépend bien entendu de la pression et de la température du milieu. L'hydroxyde de calcium (Portlandite) réagit avec le dioxyde de carbone pour donner naissance à du carbonate de calcium selon la réaction bilan suivante :



Elle s'effectue généralement de manière plutôt uniforme le long de l'armature. Le film protecteur est alors détruit de manière uniforme et la corrosion peut commencer à se développer. Les produits finaux du processus anodique sont majoritairement $F_e(OH)_2$ et $F_e(OOH)$. Dans la littérature, différents mécanismes élémentaires ont été proposés [4], [5], [6], [7], [8] et [9]. Néanmoins, la cinétique du phénomène de corrosion par carbonatation reste peu prévisible. Toutefois, il a clairement été identifié que cette

dernière dépend non seulement de l'épaisseur et de la compacité de l'enrobage (le plus épais et le plus compact le meilleur), mais aussi de l'humidité relative (maximum de corrosion : 50 à 70 % d'humidité) [10]. Lorsque le béton d'enrobage est fissuré, des chemins de migration préférentiels sont alors créés et la carbonatation du milieu s'effectue plus rapidement et de manière plus importante. En revanche, lorsque le béton est non fissuré et de bonne qualité, sa carbonatation est très lente.

1.1.3 Cas de la corrosion par pénétration des chlorures

Le second cas de corrosion correspond à la pénétration des ions chlorures. La dépassivation de l'armature s'effectue de manière localisée. Les observations montrent que la couche d'oxydes/hydroxydes ne protège plus l'armature lorsque la concentration en ions chlorures a atteint un seuil critique. L'amorçage de la corrosion se fait par l'apparition de piqûres localisées et la corrosion tend à s'étendre par la suite. Plusieurs mécanismes sont proposés dans la littérature ; on peut notamment citer les travaux de [6], [3] et de [11]. La quantité critique d'ions chlorures nécessaire à l'activation du phénomène de corrosion est soumise à de nombreuses controverses [12].

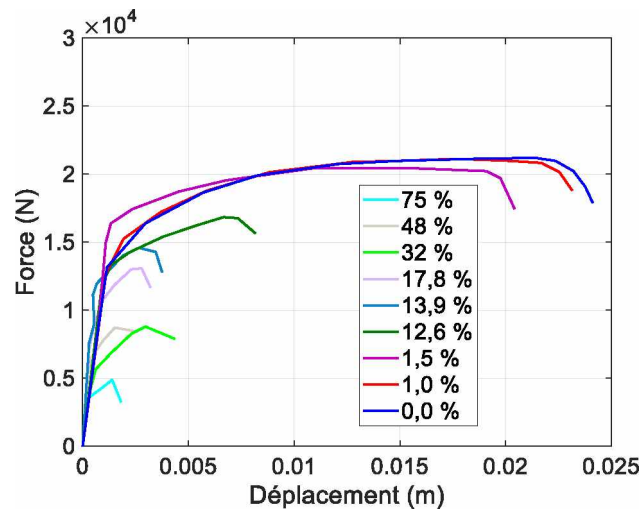
1.2 Conséquences mécaniques à l'échelle locale

Le développement de la corrosion des armatures présentes dans le béton armé entraîne des conséquences mécaniques à l'échelle locale. La littérature scientifique fait état de deux conséquences principales qui sont, d'une part, la dégradation de l'acier constitutif des armatures et, d'autre part, la variation des propriétés d'adhérence entre l'acier et le béton.

1.2.1 Dégradation de l'acier

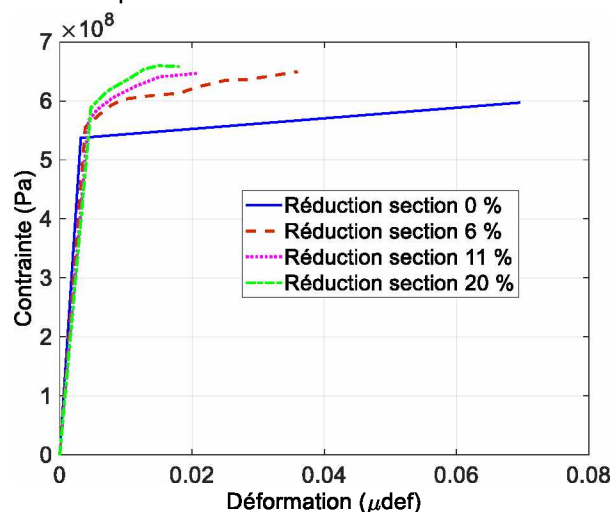
La pénétration des ions chlorures dans le béton d'enrobage conduit à de la corrosion par piqûre des aciers d'armature. Il s'en suit une diminution de section et de la déformation équivalente à rupture [13]. La base de données la plus utilisée pour identifier les paramètres des lois de comportement proposées dans la littérature pour rendre compte de cet effet se base sur des essais [13]. Des armatures d'acier ont été corrodées sous champ électrique de manière à créer des piqûres localisées de différentes profondeurs. Des essais de traction ont ensuite été effectués pour caractériser le comportement des éprouvettes. La Figure 1 - présente les courbes force/déplacement obtenues dans [13]. La dégradation est d'autant plus marquée que le degré de corrosion est important, ce dernier étant défini en termes de perte de masse exprimé en pourcentage (0 à 75 %).

Figure 1 - Réponse uniaxiale (Force, déplacement) d'armatures d'acier, corrodées à différents degrés (0 à 75 %), à des essais de traction (d'après [9]).



L'étude conduite par [10] visait à caractériser l'effet des piqûres sur la déformation de l'armature d'acier. Pour cela, quatre armatures d'acier ont été entaillées puis testées. Comme le montre, la Figure 2 - , pour des réductions locales de section de 6 %, 11 % et 20 %, le potentiel de déformation à la rupture chute respectivement de 50 %, 70 % et 75 % par rapport au témoin. À la suite de cette étude, une relation liant le degré de corrosion à la déformation équivalente à rupture a été proposée [14].

Figure 2 - Réponse uniaxiale (Contrainte, déplacement) d'armatures d'acier entaillées à différentes profondeurs à des essais de traction (d'après [14]).



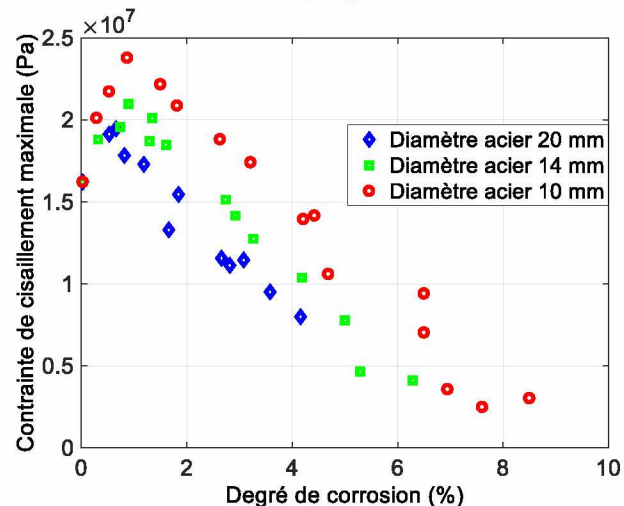
D'autres essais de traction ont également été réalisés sur des armatures d'acier avec des piqûres de corrosion de différentes profondeurs [15]. Les résultats obtenus ont permis de dégager une loi empirique reliant la déformation plastique cumulée à rupture au degré de corrosion. Une étude numérique a permis a posteriori de justifier la relation obtenue, qui a été introduite dans une loi de comportement macroscopique couplant endommagement et plasticité. Cette loi est présentée plus en détail dans la suite.

1.2.2 Variation des propriétés d'adhérence entre l'acier et le béton

Une variation des propriétés d'adhérence entre l'acier et le béton résulte du développement de la corrosion dans les structures en béton armé. Cela concerne principalement la corrosion uniforme même si, localement, la corrosion localisée entraîne également des modifications de l'interface entre l'acier et le béton. La corrosion réduit l'adhérence à cause de l'affaiblissement du confinement de l'armature, produit à la fois par la fissuration du béton et par la corrosion de l'armature [16]. De

plus, une certaine « lubrification » due à la présence des produits de corrosion, apparaît entre l'acier et le béton. Des essais d'arrachement sur éprouvettes ont été réalisés pour caractériser l'influence de la corrosion à différents degrés et de la fissuration du béton d'enrobage sur l'adhérence [17], [18]. Les résultats obtenus sont présentés à la Figure 3 - .

Figure 3 - Réponses d'essais d'arrachement réalisés sur des éprouvettes corrodées à différents degrés (Contrainte de cisaillement, perte de masse %)(d'après [18]).



L'allure générale des courbes contrainte/glisement présentées sur la Figure 3 - montre une variation de l'adhérence entre l'acier et le béton en fonction, d'une part, du diamètre des armatures d'acier utilisées et, d'autre part, du degré de corrosion. Pour les faibles degrés de corrosion (environ 1 %), l'adhérence augmente alors que pour les degrés supérieurs, celle-ci diminue. Plusieurs explications ont été avancées pour tenter de comprendre ces variations. Les auteurs estiment que le confinement de l'armature d'acier est accru tant que les produits de corrosion n'ont pas provoqué la fissuration du béton due à leur expansion. Ainsi, le béton resterait dans un domaine élastique. Dès que sa contrainte limite de traction est atteinte, des fissures apparaissent conduisant à une perte de confinement de l'armature, ce qui se traduit par une diminution de l'adhérence entre l'acier et le béton. D'autres études expérimentales [15] confirment ces observations [18]. De nombreux chercheurs se sont intéressés à comprendre les mécanismes locaux caractéristiques du phénomène de corrosion. D'autres équipes se sont consacrées à caractériser les effets de la corrosion sur le comportement global d'éléments de structure.

1.3 Conséquences mécaniques à l'échelle structurale

De manière générale, les résultats des études précédentes permettent d'entrevoir des conséquences à l'échelle structurale. En effet, la corrosion des armatures entraîne une modification du comportement en service d'éléments de structure ou de structures entières, jusqu'à leur défaillance [19].

1.3.1 Comportement en service

Des poutres en béton armé conservées en ambiance saline pendant 14 ans ont été étudiées [14]. L'objectif de ces travaux était de mettre en lumière l'effet de la perte de section des armatures couplé avec les variations de l'adhérence entre l'acier et le béton. Il en ressort d'une part, que la corrosion qui s'est développée sur les armatures en zone comprimée n'a pas d'influence sur le comportement en service de l'ouvrage. D'autre part, la perte d'adhérence entre l'acier et le béton en zone tendue est apparue

comme le facteur majeur responsable de l'augmentation de la flèche des poutres. Cela est dû au fait que le béton situé entre les fissures en zone tendue ne participe plus de manière efficace à la reprise des efforts de traction [14].

Des simulations numériques visant à appréhender le comportement en service d'un pont en béton armé sujet à de la corrosion ont été réalisées [20]. Elles ont permis de faire apparaître des variations significatives de sa fiabilité au cours du temps. Deux cas de corrosion (généralisée et par piqûres) ont été pris en compte. Le comportement en service est influencé essentiellement par la corrosion généralisée. Ces résultats sont cohérents avec d'autres obtenus par ailleurs [21].

Pour des poutres corrodées artificiellement (méthode intensiostatique) un mode de rupture propre aux éléments de structures corrodés a été mis en évidence [16]. En effet, ces poutres corrodées rompent par un mode lié au cisaillement (effort tranchant) plutôt que par flexion, comme c'est classiquement le cas lorsque la corrosion est absente. Ces résultats viennent confirmer ceux publiés quelques années auparavant [22].

1.3.2 Comportement ultime

Sur les mêmes éprouvettes que celles étudiées précédemment, des essais ont été réalisés sous un chargement de flexion jusqu'à rupture [14]. Pour ces essais, à l'échelle de la structure, le phénomène de corrosion se traduit par trois effets essentiels : une perte de raideur, une perte de résistance et une diminution de la ductilité au-delà du maximum de contrainte. L'utilisation d'un modèle mécanique a permis de montrer que la réduction de section des armatures était largement responsable de la perte de la capacité portante des poutres [14]. La perte de ductilité pourrait aussi être liée à cette réduction de section [14]. Des simulations à rupture [20] et [21] ont montré que la corrosion par piqûres tendait à affecter davantage que la corrosion par carbonatation la capacité portante des structures.

Pour des poutres et des poteaux corrodés (méthode intensiostatique), la perte de capacité portante n'était pas seulement due à une réduction de la section d'acier, mais aussi à la formation de fissures due à la corrosion [23]. En particulier, pour une perte de masse voisine de 2 %, la capacité portante diminuait de 17 % [23]. Dans le cas d'une corrosion généralisée, la perte de ductilité est liée à la perte d'adhérence locale entre l'acier et le béton [23] et [24].

Une étude a été réalisée en mettant en œuvre des éprouvettes non armées en zone comprimée. Cette caractéristique permet d'assurer que les poutres atteignent leur rupture par détérioration de la liaison entre l'acier et le béton [25] et [26]. Ces poutres, corrodées à différents degrés (méthode intensiostatique), ont été testées en flexion. Les résultats d'essais montrent que la capacité portante résiduelle est peu sensible à la valeur du courant appliqué. De plus, la perte de capacité portante est due non seulement à la réduction de la section d'acier, mais aussi à la perte d'adhérence entre l'acier et le béton. Une formule empirique est proposée pour estimer la capacité portante d'éléments de structure affectés par le phénomène de corrosion [26].

À retenir

- Deux agents agressifs sont à l'origine de la corrosion des armatures : les ions chlorures et le dioxyde de carbone.
- L'acier est dégradé, sa déformation ultime diminue.

- L'adhérence à l'interface entre l'acier et le béton est modifiée. Cela s'explique par la présence de rouille à l'interface et par la fissuration du béton au voisinage de l'armature.

2 Stratégies numériques de modélisation

Précédemment, il a été montré que la corrosion des armatures entraîne des dégradations de l'acier et de l'interface entre l'acier et le béton, et enfin de la structure en béton armé. C'est pourquoi, depuis les années 80, de nombreux chercheurs se sont intéressés à proposer des modèles pour être en mesure de prendre en compte l'effet de la corrosion des armatures sur le comportement mécanique de la structure étudiée. Dans la suite, un exposé des principales modélisations est réalisé, afin d'identifier les atouts et les limites de chacune des classes de modèles.

2.1 Généralités

2.1.1 Approches analytiques

Les modèles analytiques calculant la capacité portante résiduelle en présence de corrosion sont très souvent fondés sur la théorie des poutres à laquelle certains ingrédients sont ajoutés. Par exemple, un modèle de poutre très simple auquel sont ajoutés les effets de la réduction de la section des armatures en acier a été utilisé [27]. Dans ce cas, une équation externe pilote la réduction de section en fonction du temps. Par ailleurs, [28] [29] proposent une formulation fondée sur la théorie des poutres permettant d'estimer la réponse structurale d'éléments de structure sollicités en flexion en présence de corrosion. Le modèle nécessite la connaissance précise de la distribution des fissures de flexion et de corrosion. En effet, une longueur de transfert est introduite dans la formulation afin d'écrire l'équilibre des efforts entre le béton et l'acier.

La **longueur de transfert** est la distance, le long d'une armature d'acier, caractérisée par le fait que le transfert d'efforts s'opère de manière optimale entre l'acier et le béton.

Lorsque la fissuration est telle qu'une armature ponctue une ou plusieurs fissures, la longueur de transfert devient moins importante car aucun effort n'est transmis par la fissure. L'ensemble de ces développements a été étayé par l'étude expérimentale de poutres en béton armé corrodées de manière naturelle pendant plus de 16 ans. Dans le même esprit les travaux de [27], [30] proposent un modèle probabiliste pour estimer le comportement ultime de poutres en béton armé précontraint. Le phénomène de corrosion est pris en compte dans le modèle à travers une réduction de la section des armatures. Cette approche, comme celle proposée par [27], a plusieurs avantages: en premier lieu elle reste simple, en second lieu elle permet d'obtenir des résultats globaux satisfaisants et enfin, elle prend explicitement en compte les incertitudes de mesure liées aux différentes variables en jeu.

2.1.2 Approches numériques

2.1.2.1 Théorie de l'endommagement

Les travaux de [31] et [32] s'appuient sur la mécanique de l'endommagement au sens large. Ces auteurs proposent une loi constitutive de l'interface entre l'acier et le béton basée sur l'expansion des produits de corrosion, comme déjà proposé par ailleurs [33]. Le modèle utilisé est de type rhéologique et il est décrit dans un cadre éléments finis standard. Cette approche offre le mérite de montrer comment une modélisation du phénomène de corrosion est possible sans pour autant prendre en compte l'ensemble des effets spécifiques qui lui sont propres (gonflement, anélasticité des produits de corrosion, ...).

Au contraire des auteurs précédents, d'autres auteurs [34] tentent de prendre en compte un grand nombre de paramètres liés aux effets de la corrosion sur le

comportement des différents matériaux constitutifs. Ainsi, le béton est modélisé à partir d'une loi d'endommagement à laquelle une variable d'endommagement d'origine chimique a été ajoutée. Cependant, l'existence de deux variables d'endommagement ne peut être justifiée thermodynamiquement. L'acier est supposé élastoplastique avec écrouissage isotrope. La section des armatures varie en fonction du degré de corrosion imposé. L'adhérence entre l'acier et le béton est décrite par deux lois : une de type frottant et l'autre de type endommagement. L'effet de la corrosion sur l'adhérence est pris en compte par l'addition d'une variable d'endommagement, dépendant de la diminution de la section d'acier. Ainsi, l'adhérence entre l'acier et le béton est explicitement influencée par le degré de corrosion imposé. Les résultats sont comparés à des essais classiques de la littérature et de bonnes corrélations ont été obtenues. Toutefois, il reste essentiel de noter que l'identification des paramètres gérant l'évolution de l'adhérence entre l'acier et le béton en fonction du degré de corrosion requiert en général des essais de type pull-out réalisés à différents degrés de corrosion.

2.1.2.2 Théorie de la plasticité

Un des modèles des plus importants a été élaboré dans le cadre de la théorie de la plasticité [35], [36] et [37]. Il permet des études des éléments de structure en béton armé dégradés par la corrosion, par méthode aux éléments finis. C'est un modèle de type multicouche, c'est-à-dire que la réduction de la section d'acier est gérée de manière fortement couplée à l'expansion des produits de corrosion. La rouille est modélisée comme introduisant de la compression par une loi qui rigidifie la structure. En effet, expérimentalement [35], [36] et [37], les produits de corrosion se comportent comme un matériau de type granulaire, ce qui se traduit par le fait que leur rigidité en compression augmente avec l'intensité de la contrainte qui leur est appliquée. A l'opposé de la proposition de [34], le modèle de Lundgren permet de décrire les variations de l'adhérence entre l'acier et le béton sans supposer une loi dédiée. Autrement dit, ces variations d'adhérence constituent une grandeur de sortie. Cependant, du point de vue du coût numérique, la mise en œuvre d'un tel modèle n'est pas triviale car l'armature doit être maillée entièrement de manière explicite.

2.1.3 Synthèse

La communauté scientifique a proposé de modéliser l'interface entre l'acier et le béton en présence de corrosion depuis plusieurs décennies. Ces travaux de modélisation ont été réalisés en recourant à différents cadres théoriques, des plus pragmatiques (analytique, semi-analytique, etc.) aux plus sophistiqués (méthode des éléments finis, éléments de type joint, etc.). Les approches analytiques ou semi-analytiques sont pour la plupart simples à mettre en œuvre. En revanche, elles intègrent une part importante d'empirisme ou de jugements d'experts qui se traduit par l'introduction de coefficients correctifs calibrés sur la base de résultats d'essais spécifiques et par suite, elles sont peu transposables à l'échelle de l'élément de structure ou de l'ouvrage. A contrario, les approches dites numériques utilisent la méthode des éléments finis, pouvant ainsi recevoir des lois de comportement fines et dédiées à la description mécanique des effets de la corrosion des armatures. Toutefois, recourir à de telles approches peut être complexe pour représenter de manière concomitante les trois principales conséquences de la corrosion : la fissuration du béton, les variations de l'adhérence entre l'acier et le béton et la diminution de la section résistante des aciers. Actuellement, les outils basés sur la méthode aux éléments finis sont très répandus. C'est donc dans ce cadre qu'il apparaît important de disposer des principales clefs permettant de prendre en compte les conséquences mécaniques de la corrosion des armatures sur le comportement mécanique d'éléments de structure en béton armé.

2.2 Approche 0D

2.2.1 Principe

L'approche dite 0D repose sur l'utilisation de modèles numériques s'appuyant sur un maillage composé d'éléments finis classiquement utilisés par l'ingénierie. À titre d'exemple, pour décrire un élément de structure simple en béton armé avec ce type d'approche, deux méthodes sont possibles :

- méthode 1 : s'appuyer sur une description homogénéisée des paramètres de rigidité des armatures en acier ;
- méthode 2 : s'appuyer sur une description distincte du béton et des armatures en acier, ces dernières étant décrites à l'aide d'éléments de type barre, ce qui permet de leur attribuer des lois de comportement spécifiques.

Dans ce contexte, le principal mécanisme associé au développement de la corrosion des armatures qui est pris en compte est la dégradation de l'acier. Pour cela, deux approches sont possibles. La première, qui est la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre, consiste à réduire de manière homogène ou non l'aire des sections droites des armatures d'acier. La réduction des sections droites des armatures ne permet pas, a priori, de modifier les propriétés à rupture de l'acier. En effet, pour cela, le phénomène de rupture locale de l'acier devrait être pris en compte en amont ce qui n'est pas le cas car l'acier est décrit de manière homogénéisée. La seconde approche, quant à elle, est fondée sur l'utilisation de lois de comportement d'acier prenant en compte explicitement le phénomène de rupture locale dès lors que la déformation ultime est dépassée (ex. loi de comportement proposée par [15]).

2.2.2 Conséquence mécanique locale

Les conséquences mécaniques associées à la prise en compte des effets locaux de la corrosion des armatures sont présentées ci-après.

L'échelle dite **locale** est caractérisée par une dimension caractéristique dont l'ordre de grandeur est comparable à celui d'un volume élémentaire représentatif (VER). En d'autres termes, c'est à cette échelle que l'on observe classiquement la loi de comportement exprimée en contraintes et déformations.

Pour la méthode 1 (cf. § 2.2.1), seule la section droite des armatures d'acier est modifiée. En effet, les dégradations du béton et de l'interface entre l'acier et le béton ne sont pas prises en compte. Par ailleurs, les propriétés de rigidité du béton et de l'acier sont décrites de manière homogénéisée [38]. La rigidité de l'acier étant proportionnelle à l'aire de sa section droite, si cette dernière diminue, alors la rigidité de l'acier diminue aussi. Ainsi, la principale conséquence de la diminution des sections d'acier réside dans la diminution de la résistance locale des armatures en acier. Ainsi, la plasticité est atteinte pour une valeur de la contrainte inférieure à celle nécessaire en l'absence de corrosion.

Pour la méthode 2 (cf. § 2.2.1), les possibilités de décrire finement l'effet de la corrosion sur le comportement mécanique de l'acier sont accrues. En effet, une loi de comportement dédiée à l'acier est prise en compte. Ainsi, il est possible de rendre compte de la diminution de raideur, de la diminution de la déformation seuil entre les régimes élastique et plastique, et, enfin, de la dégradation de l'acier (diminution de la déformation à rupture). À titre d'exemple, on peut citer la loi de comportement développée par [15]. Cette dernière s'appuie sur la formulation d'une loi élasto-plastique avec endommagement, très classique et bien connue de la littérature, avec un écrouissage isotrope de type Chaboche et Lemaître [39]. La déformation plastique

est pilotée par la déformation élastique et suit une loi d'écrouissage isotrope non linéaire de la forme de celle présentée par l'équation (8) :

$$(8) \quad R(r) = Ar^m$$

où R est la fonction d'écrouissage isotrope (ou fonction de consolidation), r est la variable d'écrouissage, A et m sont deux paramètres matériaux à déterminer. Une variable d'endommagement D est introduite pour décrire le comportement de l'acier proche de la rupture. Cette dernière est supposée être fonction de la déformation plastique cumulée p définie comme suit dans le cas unidimensionnel :

$$(9) \quad p = \sqrt{\int_0^t (\varepsilon^p(\tau))^2 d\tau}$$

où ε^p est la déformation plastique. Ainsi, la loi d'évolution de la variable d'endommagement s'écrit comme suit :

$$(10) \quad D = D_c \frac{p - p_D}{p_R - p_D}$$

où D_c est l'endommagement maximal, p_D est la déformation plastique cumulée au-delà de laquelle l'endommagement est activé et p_R est la déformation plastique cumulée au-delà de laquelle l'acier est supposé rompre. Le phénomène de corrosion des armatures est pris en compte en ajoutant une relation extérieure entre la déformation plastique cumulée à rupture p_R et le degré de corrosion macroscopique. Par exemple, cette relation peut prendre la forme suivante [13] :

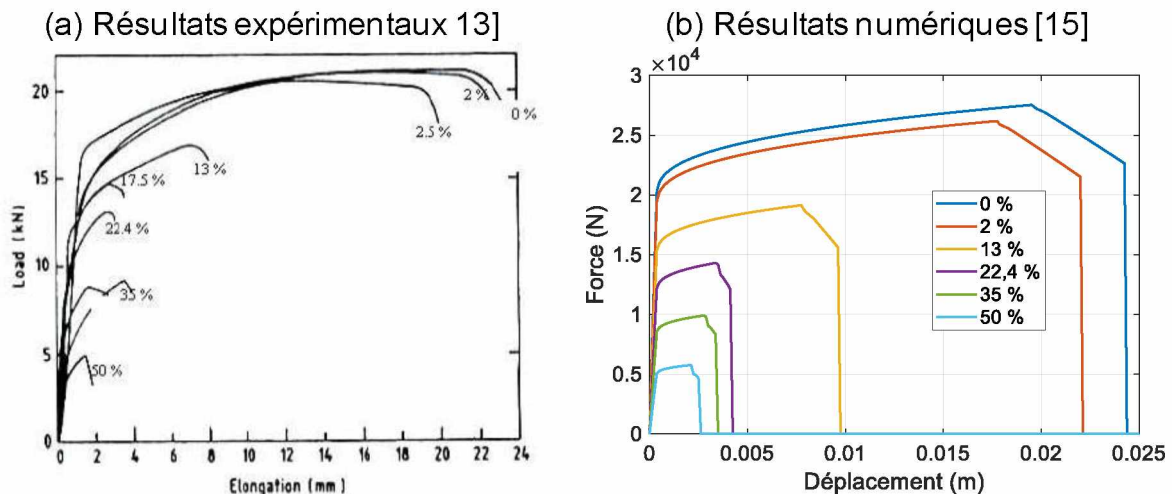
$$(11) \quad \varepsilon_R = \begin{cases} -0,0111T_c + 0,2345 & \text{si } T_c \leq 15 \% \\ -0,0006T_c + 0,051 & \text{sinon} \end{cases}$$

où T_c est le degré de corrosion macroscopique défini selon l'équation (12) :

$$(12) \quad T_c(t) = \frac{d_0 - d(t)}{d_0}$$

où t est l'instant considéré, d_0 est le diamètre de l'armature considérée sans corrosion et $d(t)$ est le diamètre de l'armature avec corrosion à l'instant t . On peut noter naturellement que l'équation (12) implique que la condition $d(t) \leq d_0$ soit vérifiée. Par ailleurs, la réduction de l'aire des sections droites des armatures est prise en compte à travers le degré de corrosion macroscopique. À titre illustratif, les résultats locaux qu'il est possible d'obtenir avec la loi de comportement développée par [15] sont comparés qualitativement aux résultats obtenus par [9] sur des armatures de diamètre 6 mm dans la Figure 4 - . Les paramètres matériaux n'ont pas fait l'objet d'une détermination spécifique, ce qui explique les écarts observés. En revanche, l'allure des courbes décrites précédemment est bien retrouvée, avec en particulier la diminution du déplacement et de la force lorsque le degré de corrosion macroscopique augmente.

Figure 4 - Réponses d'une armature d'acier à un essai de traction (Force/déplacement) pour différents degrés de corrosion macroscopique [15].



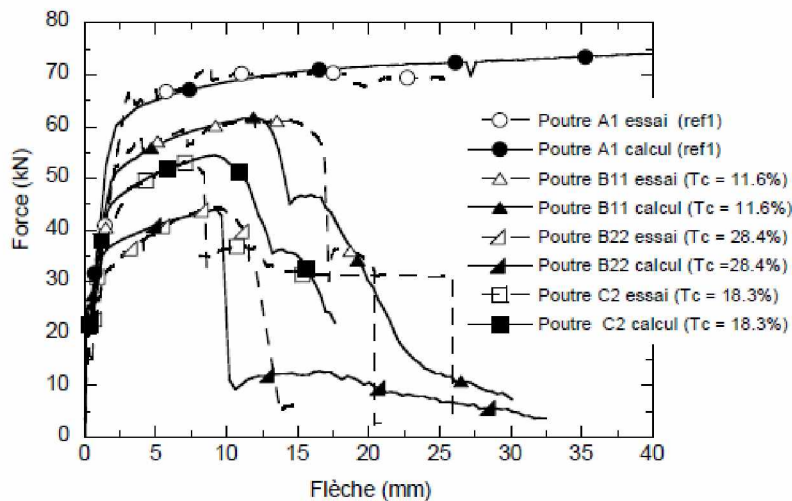
2.2.3 Conséquence mécanique structurale

Les effets de la corrosion des armatures à l'échelle de la structure dans le cas où seuls les aciers sont influencés sont présentés ci-après. Dans ce cas, la fissuration du béton ou encore les variations de l'adhérence entre l'acier et le béton ne sont pas prises en compte.

L'échelle dite **structurale** est caractérisée par une dimension caractéristique dont l'ordre de grandeur est comparable à celui d'un élément de structure. En d'autres termes, c'est à cette échelle que l'on observe classiquement la réponse d'un élément de structure en force/déplacement ou encore moment/courbure.

Dans la littérature, très peu d'essais expérimentaux ont été réalisés avec l'objectif d'étudier chacune des conséquences mécaniques dues au phénomène de corrosion de manière séparée. Toutefois, des travaux ont consisté à réaliser des essais de flexion quatre points sur des poutrelles en béton armé [40]. Trois types de poutrelles ont été considérés : la poutrelle A n'est pas sujette au phénomène de corrosion et par conséquent, est considérée comme la référence ; les poutrelles de type B ont été fabriquées en pré-corrodant les armatures en acier ; les poutrelles de type C ont été sujettes à une corrosion in situ, c'est-à-dire que les armatures ont été corrodées artificiellement après coulage. Une interprétation des résultats d'essais a été proposée à l'aide de différentes stratégies de calcul, dont une équivalente à la méthode 2 de l'approche 0D décrite précédemment [40]. La Figure 5 montre la comparaison entre les essais et des calculs, pour l'ensemble des types de poutrelles. Le comportement global est bien décrit et ce grâce à la prise en compte de la loi de comportement pour décrire les effets de corrosion sur les armatures [15]. En particulier, une série de sauts en efforts apparaît, caractéristique de la redistribution des efforts internes après rupture localisée d'un acier. Par ailleurs, la non prise en compte de la fissuration initiale due à l'expansion des produits de corrosion semble n'avoir qu'une très faible influence sur la réponse globale de la structure.

Figure 5 - Réponses d'éléments de structure sujets à un chargement de flexion quatre points (force/flèche) pour différents niveaux de corrosion [40].



2.3 Approche 1D

2.3.1 Principe

Une approche alternative à l'approche 0D (cf. § 2.2), visant à décrire les conséquences mécaniques du phénomène de corrosion des armatures, est l'approche 1D. Le principe de cette dernière est d'enrichir la description des différents mécanismes agissant sur les propriétés mécaniques d'éléments de structure atteints de corrosion, en prenant en compte la dégradation de l'acier ainsi que les variations des propriétés d'adhérence de l'interface entre l'acier et le béton. Le vocabulaire 1D est utilisé car, pour cette approche, les armatures en acier sont décrites en s'appuyant sur les éléments finis unidimensionnels comme des éléments barres. **De manière plus précise, le comportement de l'acier est décrit par une loi de comportement dédiée, qui peut être à titre illustratif celle évoquée au paragraphe 2.2.2 [15].** Le comportement de l'interface entre l'acier et le béton, quant à lui, est pris en compte de manière implicite, c'est-à-dire qu'aucun support d'éléments finis n'est ajouté spécifiquement pour cela. En effet, la loi de comportement de l'acier est modifiée de manière à prendre en compte l'état mécanique de l'interface entre l'acier et le béton qui va nécessairement influencer le transfert d'efforts entre le béton environnant et les armatures en acier.

Le **transfert d'efforts** entre deux matériaux (acier et béton par exemple) composant un matériau composite (béton armé par exemple) est le phénomène de chargement/déchargement progressif de ces deux matériaux, sous chargement extérieur, permettant au matériau composite d'atteindre un état d'équilibre. Il dépend des propriétés mécaniques (raideur, résistance, etc.) des matériaux en présence.

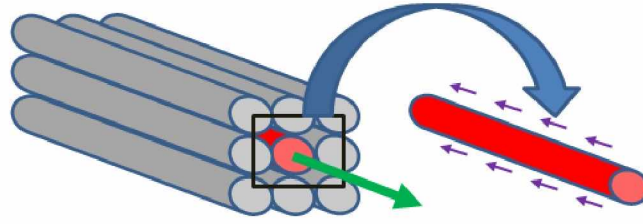
La fissuration du béton liée à l'expansion des produits de corrosion n'est pas prise en compte dans cette approche.

2.3.2 Conséquence mécanique locale

L'approche 1D prend en compte au sein de la loi de comportement de l'acier l'effet de la dégradation de l'interface entre l'acier et le béton. Bien que différentes approches aient été proposées [41], [42] et [43], leur principe reste similaire. Il consiste à supposer localement que les efforts internes dans l'armature d'acier sont équilibrés par les contraintes de cisaillement à l'interface entre l'acier et le béton. Cette hypothèse est représentée sur la Figure 6 - .

Figure 6 - Illustration de la condition d'équilibre locale entre les efforts déployés à

l'interface entre l'acier et le béton (élément en rouge à droite – les flèches mauves représentent les contraintes à l'interface entre l'acier et le béton) et les efforts internes dans l'armature d'acier (élément rouge à gauche – l'effet interne est représenté par la flèche verte) [41].



De manière plus précise, la déformation totale est supposée être décomposée :

$$(13) \quad \varepsilon = \lambda \varepsilon + (1 - \lambda) \varepsilon$$

où λ est le facteur de partition variant entre 0 et 1. Le terme $\lambda \varepsilon$ représente la déformation de l'acier et le terme $(1 - \lambda) \varepsilon$, la déformation de l'interface entre l'acier et le béton. Ainsi, il apparaît clairement que le facteur de partition permet de pondérer les contributions de l'acier et de l'interface à la déformation totale de l'acier. Ce facteur de partition constitue une nouvelle variable qu'il convient de déterminer. Pour cela, l'hypothèse d'équilibre des efforts internes dans l'acier et des efforts déployés à l'interface entre l'acier et le béton présentée au paragraphe 2.3.1 est introduite comme suit :

$$(14) \quad \int_{S_a(x)} \sigma(s) ds - \int_{S_{int}(x)} \tau(s) ds = 0$$

où S_a est la section d'acier, S_{int} la section extérieure à l'armature, x l'abscisse courante, s l'abscisse curviligne permettant de repérer la section droite de l'armature, σ la contrainte normale dans l'armature d'acier et enfin, τ la contrainte de cisaillement à l'interface entre l'acier et le béton. Il peut être noté que S_{int} représente la surface qui enveloppe l'armature. L'équation (14) présentée sous une forme assez générale peut être simplifiée en supposant que les contraintes normales et de cisaillement sont constantes sur les sections d'intérêt. Ainsi, l'équation (14) prend la forme suivante :

$$(15) \quad \sigma S(x) - \tau l_{int} P(x) = 0$$

où l_{int} est une longueur appelée longueur d'ancrage et $P(x)$ est le périmètre de la section droite d'armature. Sur la base de la relation (15), il est possible d'introduire des relations de comportement qui permettent de décrire les réponses de l'acier et de l'interface entre l'acier et le béton en présence de corrosion. Ainsi, l'équation (15) peut être modifiée comme suit :

$$(16) \quad L_a(\lambda \varepsilon) S(x) - L_{int}((1 - \lambda) \varepsilon) l_{int} P(x) = 0$$

où L_a est une fonction décrivant la loi de comportement de l'acier et L_{int} une fonction décrivant la loi de comportement de l'interface entre l'acier et le béton. L'équation (16) prend ainsi la forme d'une équation scalaire comportant une unique inconnue qui est le facteur de partition λ . Il peut être remarqué à ce stade que les fonctions L_a et L_{int} sont a priori quelconques, ce qui signifie que l'approche présentée ne dépend pas des lois de comportement retenues.

Avec la loi de comportement de l'acier issue de [15] et la loi de comportement de

l'interface entre l'acier et le béton de [44], quelques résultats de calculs permettent d'illustrer l'approche 1D à l'échelle locale (Figure 7 - et Figure 8 -).

Figure 7 - Réponse d'une armature d'acier à un chargement de traction monotone en l'absence de corrosion selon l'approche 1D [41].

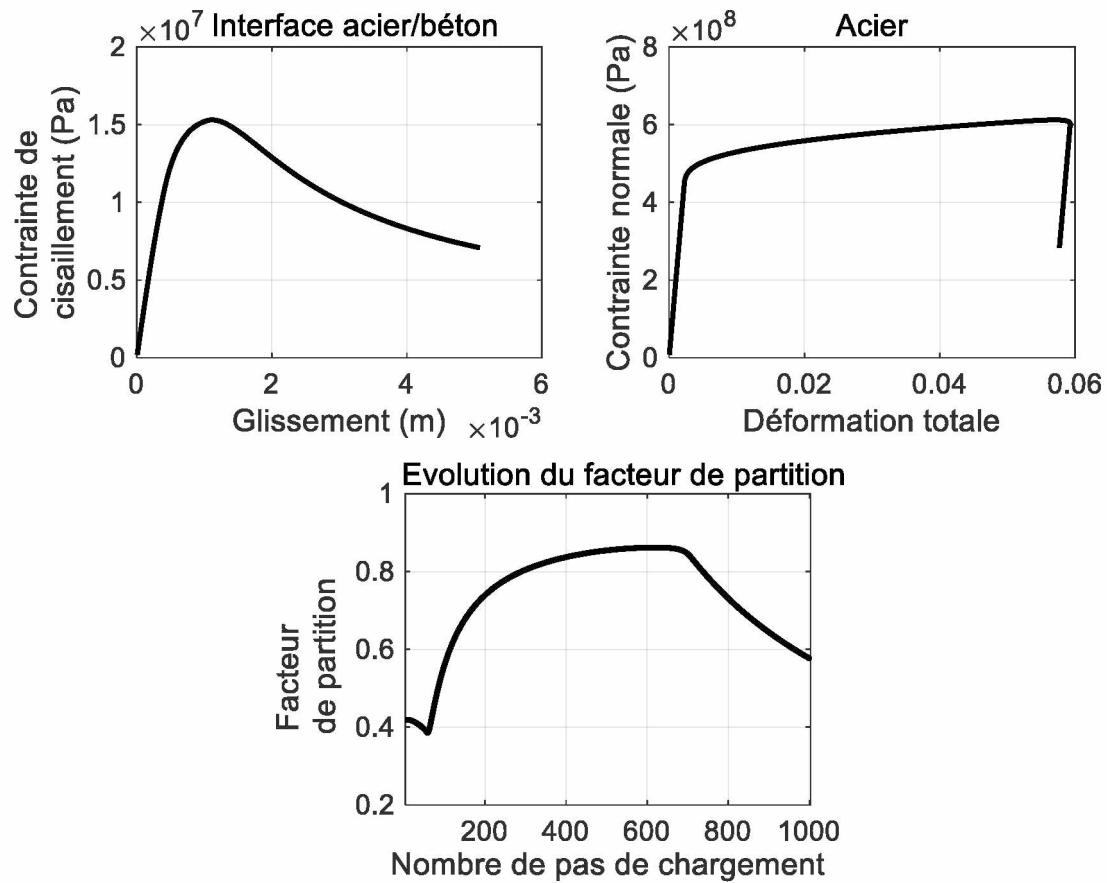
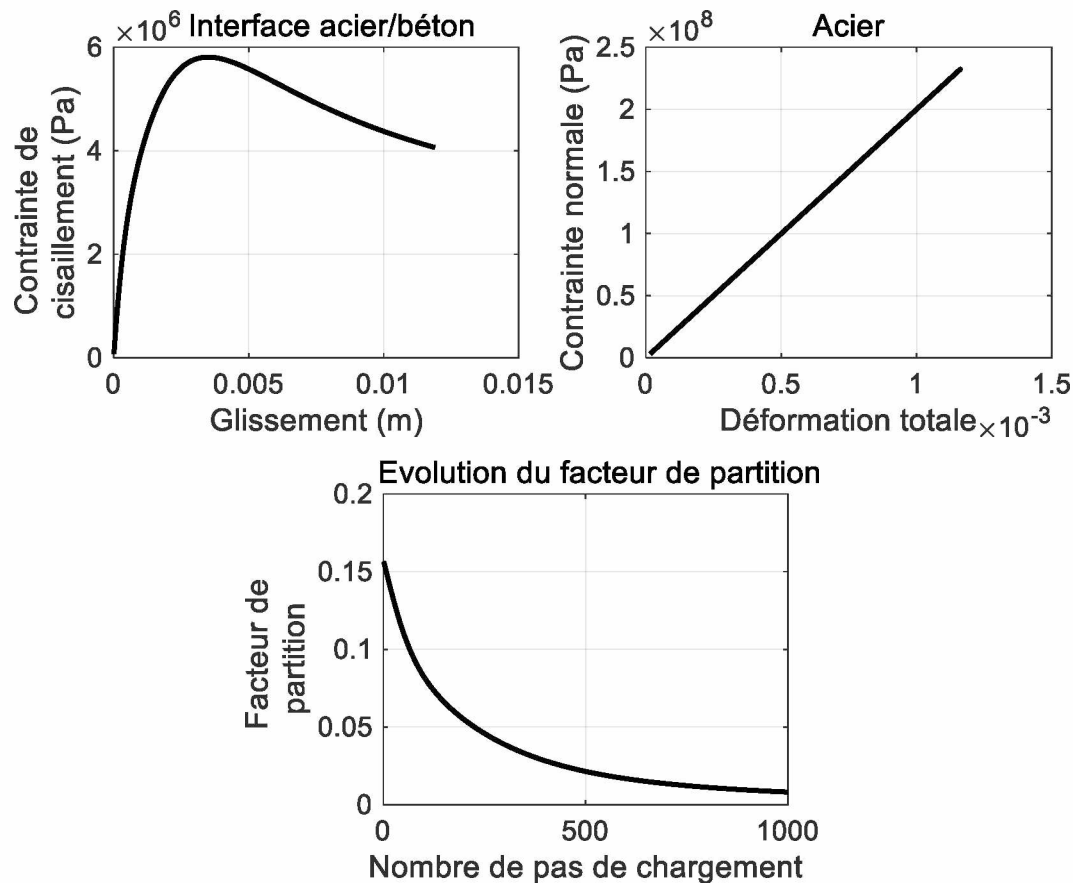


Figure 8 - Réponse d'une armature d'acier à un chargement de traction monotone en présence de corrosion ($T_c = 5,8 \%$) selon l'approche 1D [41].



Au cours de l'essai de traction, l'acier et l'interface entre l'acier et le béton se dégradent progressivement (Figure 7 -). Pour une déformation de l'acier égale à 6 %, l'armature se décharge. Cette décharge résulte en réalité du couplage entre les lois de comportement de l'acier et de l'interface entre l'acier et le béton, résultant de l'équation d'équilibre locale entre les efforts déployés à l'interface entre l'acier et le béton et les efforts internes à l'armature d'acier. D'un point de physique, cela traduit le fait que l'interface entre l'acier et le béton a atteint un niveau de dégradation tel qu'il n'est plus possible d'assurer l'état d'équilibre autrement qu'en déchargeant l'acier. Cela est d'ailleurs cohérent avec l'évolution du facteur de partition qui, d'abord, tend vers une valeur proche de l'unité, puis diminue pour tendre vers une valeur nulle. En effet, selon l'équation (13), le fait que le facteur de partition tende vers l'unité a pour conséquence de donner plus de poids à la déformation intrinsèque de l'acier et le fait qu'il tende vers une valeur nulle a pour conséquence de donner plus de poids à l'interface entre l'acier et le béton.

Sur la Figure 8 - , les résultats obtenus en présence de corrosion sont exposés. La présence de corrosion a un effet direct sur la réponse de l'interface entre l'acier et le béton ; en particulier, on peut noter la diminution de la valeur de déformation au pic de la contrainte de cisaillement par rapport au cas sans corrosion. Cette modification des propriétés mécaniques de l'interface a une conséquence directe sur la réponse de l'armature en acier. En effet, l'armature ne peut être chargée de manière significative du fait de l'état de dégradation de l'interface si bien qu'il ne lui est plus possible d'atteindre son palier plastique pour que l'équation d'équilibre puisse être vérifiée. Autrement dit, l'approche permet de décrire une impossibilité à transférer les efforts à cause de l'état de dégradation avancé de l'interface, ce qui, sur le plan physique, est cohérent.

Ces résultats montrent que l'approche 1D permet de décrire de manière relativement

simple deux des trois principales conséquences de la corrosion : la dégradation de l'acier et la dégradation de l'interface entre l'acier et le béton. Les conséquences de la prise en compte de ces deux effets à l'échelle de l'élément de structure sont illustrées ci-après

2.3.3 Conséquence mécanique structurale

La dégradation de l'acier et la dégradation de l'interface entre l'acier et le béton décrits à l'échelle locale donnent lieu à des modifications de la réponse structurale qui, selon l'état d'avancement du phénomène de corrosion, peuvent être significatives. Un exemple de structure simple en béton armé est considéré pour illustrer les résultats qui peuvent être obtenus par l'approche 1D. Toutefois, comme l'influence de la dégradation des armatures en acier à l'échelle de la structure a été mise en évidence au paragraphe 2.2, ce paragraphe met en exergue l'influence de la prise en compte d'une interface dégradable ou encore imparfaite, à partir d'une campagne expérimentale [45].

L'interface entre l'acier et le béton est qualifiée de **parfaite** lorsque le transfert d'efforts entre l'acier et le béton est réalisé en totalité. Dans le cas contraire (en particulier lorsque l'interface entre l'acier et le béton peut être dégradée), l'interface entre l'acier et le béton est qualifiée d'**imparfaite**.

[40] a réalisé deux essais de flexion trois points sur des poutres en béton armé sous chargement répété pour évaluer l'intensité du couplage entre la fissuration et la dissipation cyclique. L'éprouvette est une poutre en béton armé de 1500 mm de longueur totale et de 1400 mm de longueur entre appuis. Quatre armatures ont été considérées. Les deux armatures supérieures ont un diamètre de 8 mm et les armatures inférieures un diamètre de 14 mm. L'épaisseur d'enrobage est homogène autour de la section et égale à 10 mm. La poutre est simplement appuyée et le chargement est contrôlé en effort. Il a été appliqué en différents paliers 10 kN, 30 kN, 50 kN, 70 kN et 90 kN. À chaque palier, 10 cycles ont été effectués. L'auteur précise qu'un petit nombre de cycles a été retenu afin d'éviter tout phénomène de fatigue. Le béton constitutif de la poutre a un module d'Young de 28 000 MPa, une résistance à la compression de 40 MPa et une résistance à la traction de 2,7 MPa. Les aciers ont un module d'Young de 200 000 MPa et une limite d'élasticité de 450 MPa. Bien que les armatures présentes dans les éprouvettes ne soient pas sujettes au phénomène de corrosion, ces essais permettent néanmoins de mettre en évidence l'effet d'une interface entre l'acier et le béton non parfaite.

Dans le but d'illustrer les possibilités de l'approche 1D, la capacité portante des poutres en béton armé est évaluée. Expérimentalement, aucune donnée liée à la fissuration n'a été reportée. Deux cas ont été considérés : en premier lieu, l'interface entre l'acier et le béton a été supposée parfaite et, en second lieu, une interface imparfaite a été considérée au sens de l'approche simplifiée présentée dans le chapitre précédent. Le chargement a été contrôlé en déplacement imposé en vue d'augmenter la robustesse numérique des simulations et d'assurer une bonne description de la phase de plastification des aciers. Afin que la comparaison entre les résultats obtenus dans les deux cas précédemment mentionnés ne porte que sur la manière de considérer l'interface entre l'acier et le béton, les maillages utilisés lors des deux simulations sont les mêmes. Le béton a été modélisé selon la loi proposée par [46], l'acier selon une loi élastoplastique classique [47] et l'interface entre l'acier et le béton selon la loi proposée par [44].

Bien que l'approche 1D n'ait pas pour objectif d'évaluer une cartographie

d'endommagement, un post-traitement des résultats numériques permet de proposer des isovaleurs de la variable d'endommagement. Les évaluations des cartographies d'endommagement sont exposées sur la Figure 9 - et sur la Figure 10 - . Dans le cas d'une interface entre l'acier et le béton parfaite et dans le cas d'une interface entre l'acier et le béton imparfaite.

Figure 9 - Évaluation de la cartographie d'endommagement selon l'approche 1D – interface entre l'acier et le béton parfaite d'une poutre en flexion trois points.

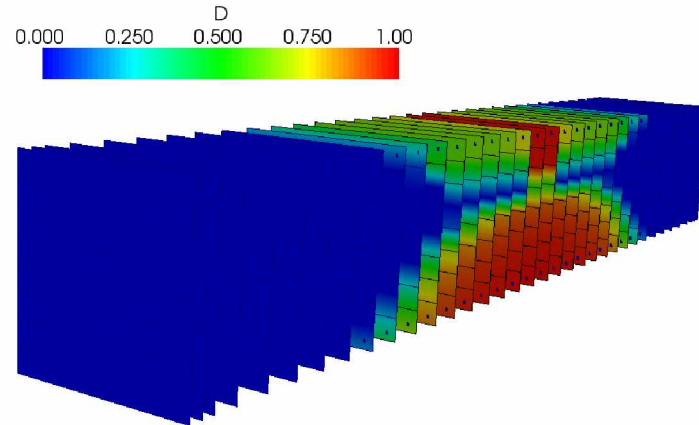
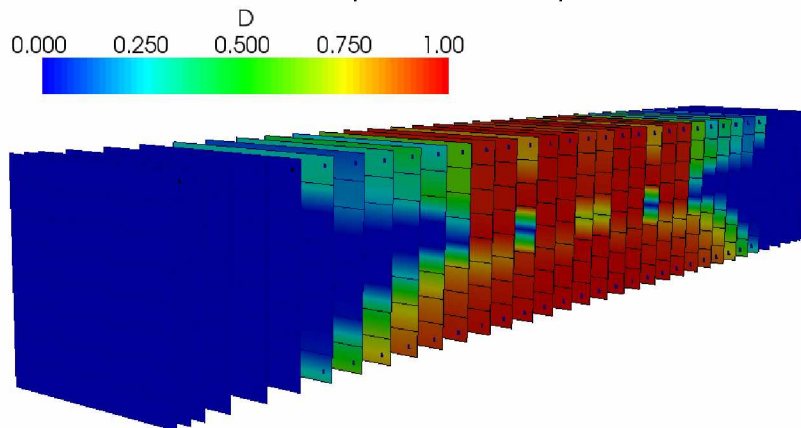


Figure 10 - Évaluation de la cartographie d'endommagement selon l'approche 1D – interface entre l'acier et le béton imparfaite d'une poutre en flexion trois points.



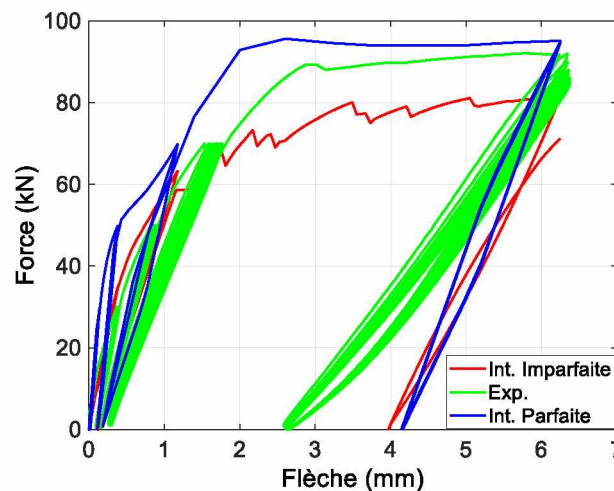
Les cartographies d'endommagement sont assez similaires. Néanmoins, la zone endommagée semble plus homogène et plus localisée dans le cas d'une interface parfaite. De plus, la rupture de l'éprouvette est caractérisée par, d'une part, un endommagement assez localisé en zone de traction et, d'autre part, une zone endommagée en compression. Cela correspond à une rupture en pivot B, selon la terminologie habituellement utilisée en béton armé. Dans le cas d'une interface imparfaite, le mode de rupture est différent. D'une part la zone d'endommagement en traction est moins haute et plus étalée selon la direction longitudinale. Elle semble suivre les armatures inférieures. D'autre part, l'endommagement dans la zone en compression n'apparaît plus selon le même mode que dans le cas précédent. En effet, l'endommagement se propage depuis la zone en traction vers la zone en compression. Autrement dit, on assiste à une rupture en pivot A. Ces différents modes de rupture ont pu être obtenus en raison du caractère imparfait de l'interface entre l'acier et le béton.

La Figure 11 - présente les résultats quantitatifs obtenus pour les deux cas étudiés. Les résultats expérimentaux sont globalement correctement décrits par le calcul. En

revanche, pour les déplacements résiduels, ces calculs, dans les deux cas, surestiment les résultats expérimentaux. Par ailleurs, en phase de raidissement, des oscillations en efforts peuvent être relevées dans le cas de l'interface entre l'acier et le béton imparfaite. Ceci est dû au fait que l'acier reprend moins d'efforts parce que l'interface entre l'acier et le béton se détériore. L'équilibre global devant être respecté, c'est le béton qui va reprendre plus d'efforts et qui va donc se fissurer davantage que dans le cas où l'interface est considérée comme parfaite.

L'effet **raidissant du béton**, encore appelé ***tension stiffening effect***, correspond à la remise en traction du béton d'enrobage par le biais de l'adhérence entre l'acier et le béton. Il en résulte donc une microfissuration entre deux macrofissures.

Figure 11 - Évaluation de la capacité portante d'une poutre en béton armé selon l'approche 1D – comparaison expérimentale/numérique considérant l'interface parfaite et imparfaite.



2.4 Approche 2D (3D)

2.4.1 Principe

La description des approches disponibles pour décrire les conséquences mécaniques du phénomène de corrosion des armatures ne saurait être complète sans aborder l'approche 2D/3D. Cette approche permet de décrire avec précision et fidélité l'ensemble des mécanismes qui apparaissent. D'une manière générale, cette approche comporte deux étapes de calcul qui peuvent éventuellement être couplées. La première étape consiste à décrire l'état de corrosion des armatures en acier. Pour cela, plusieurs choix s'offrent à l'ingénieur. D'abord, il peut recourir à une formulation du problème faisant intervenir les propriétés de diffusion des espèces en présence. Cela permet de décrire avec précision l'état de corrosion. Ensuite, il est également légitime à se concentrer principalement sur la conséquence de la corrosion, c'est-à-dire le gonflement. Ainsi, le gonflement est décrit numériquement comme un chargement thermique équivalent dont les paramètres dépendent éventuellement d'une cinétique ou encore de la nature du béton. La seconde étape consiste, quant à elle, à appliquer un chargement mécanique et à évaluer les quantités d'intérêt de la structure étudiée.

Pour cela, l'élément de structure étudié est maillé de manière très détaillée. En effet, le béton, les armatures en acier et enfin, l'interface entre l'acier et le béton sont explicitement décrits et forment la géométrie discrétisée du problème. De manière plus précise, le béton et les armatures en acier sont maillés à l'aide d'éléments finis

volumiques [C6004]. Ainsi, il est possible de décrire l'interface entre l'acier et le béton par un domaine de mesure nulle à l'aide d'éléments finis particuliers appelés éléments joints.

En mathématique, la **mesure** d'un domaine est une fonction (plus exactement une application) qui associe une valeur réelle positive à un ensemble. De plus, cette application doit vérifier deux conditions : d'une part que la mesure de l'ensemble vide est nulle et d'autre part que la mesure d'ensembles disjoints est égale à la somme des mesures de ces ensembles.

En effet, une interface entre deux éléments finis volumiques peut être décrite lorsque cela est nécessaire par un comportement particulier (contact, frottement, etc.). Pour cela, l'interface est géométriquement représentée par un élément fini joint. À titre d'illustration : en 2D, un élément joint est composé de deux segments superposés ; en 3D, un élément joint est composé de deux éléments plans superposés. Dans les deux cas, l'épaisseur de l'élément joint est nulle. La loi de comportement qu'il peut supporter est formulée en vecteurs traction/déplacements relatifs.

Dans les champs disciplinaires relevant classiquement du génie civil, le fait d'appliquer un chargement extérieur de compression ou le fait qu'un chargement de compression apparaisse par réaction est appelé **confinement**. Le confinement est qualifié d'**actif** lorsqu'il résulte d'un chargement extérieur (cas de la précontrainte par exemple) et de **passif** lorsqu'il résulte d'une réaction (cas des armatures transversales dans le béton armé).

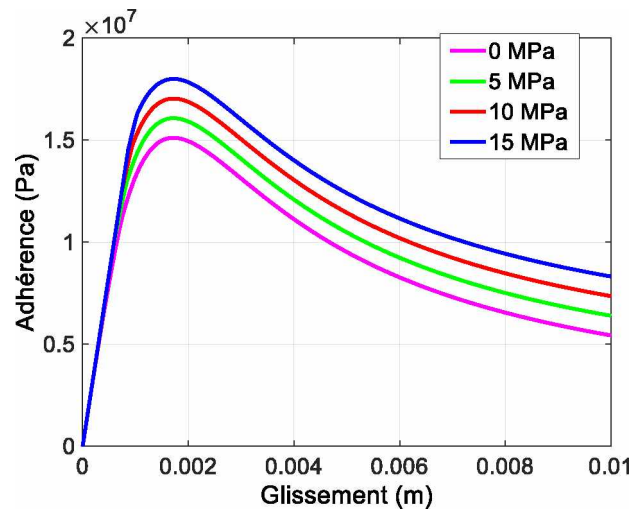
Décrite telle que présentée précédemment, la géométrie de l'élément de structure peut supporter des lois de comportement fines pour décrire la réponse mécanique locale de chacun des matériaux en présence.

2.4.2 Conséquence mécanique locale

L'approche 2D/3D permet, de manière intrinsèque, de prendre en compte des lois de comportement décrivant avec fidélité les mécanismes locaux qui interviennent lors du développement du phénomène de corrosion des armatures. Dans la suite, le comportement local de l'interface entre l'acier et le béton en présence de corrosion est décrit. Il est toutefois essentiel de garder à l'esprit que le comportement du béton peut être décrit par une loi prenant en compte sa fissuration. Pour cela, une loi d'endommagement est classiquement utilisée. Par ailleurs, le comportement de l'acier en présence de corrosion peut être décrit de manière à reproduire les effets mis en lumière au paragraphe 2.2.

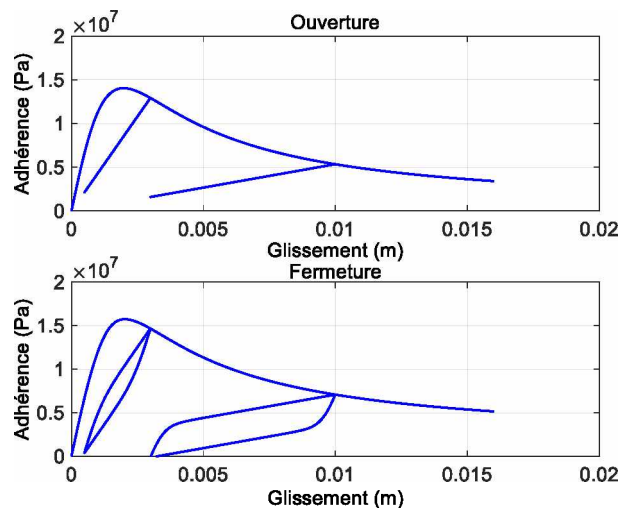
Du fait du caractère multiaxial de la loi de comportement de l'interface entre l'acier et le béton [44], plusieurs mécanismes peuvent être pris en compte à l'échelle locale. En premier lieu, la réponse locale de l'interface entre l'acier et le béton est sensible aux effets du confinement qu'il soit passif ou actif [48]. Ainsi, selon l'intensité de la contrainte radiale, l'adhérence maximale est susceptible d'augmenter. L'évolution de l'adhérence en fonction du glissement pour différents niveaux de confinement est présente sur la Figure 12 - .

Figure 12 - Évolution de l'adhérence en fonction du glissement pour différents niveaux de confinement extérieur.



En deuxième lieu, un couplage entre les modes I (ouverture/fermeture) et II (cisaillement) a été mis en évidence expérimentalement [49]. Ce couplage, d'ordre purement mécanique et non conditionné par la présence de corrosion, a pour effet de modifier la réponse cyclique de l'interface entre l'acier et le béton lorsqu'elle fonctionne en cisaillement si un décollement local entre l'acier et le béton apparaît. Sur la Figure 13 - l'évolution de l'adhérence à l'interface entre l'acier et le béton en fonction du glissement sous un chargement de cisaillement cyclique non alterné est présentée. Des effets d'hystérésis apparaissent uniquement en l'absence de décollement local. D'un point de vue physique, cela peut s'expliquer par le fait qu'un décollement local entraîne une faible mobilisation des frottements internes et donc, par conséquent, limite les effets d'hystérésis.

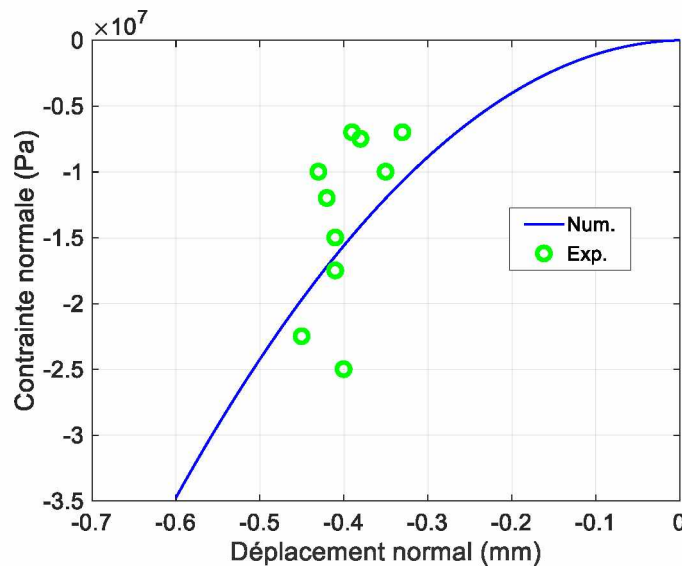
Figure 13 - Évolution de l'adhérence en fonction du glissement en l'absence de décollement local et en présence de décollement local à l'interface entre l'acier et le béton.



En troisième lieu, le phénomène de corrosion conduit à la création d'un quatrième matériau : les produits de corrosion. Les produits de corrosion ont tendance à s'intercaler entre l'acier et le béton et, lorsqu'une quantité suffisamment significative est présente, ils sont susceptibles de présenter un comportement qui leur est propre. Plusieurs auteurs, comme [50], ont réalisé des prélèvements de produits de corrosion et ont réalisé des essais de compression pour identifier leur comportement. Sur la Figure 14 - on peut observer que cet effet est pris en compte du fait du caractère multiaxial de la loi de comportement de l'interface entre l'acier et le béton en présence

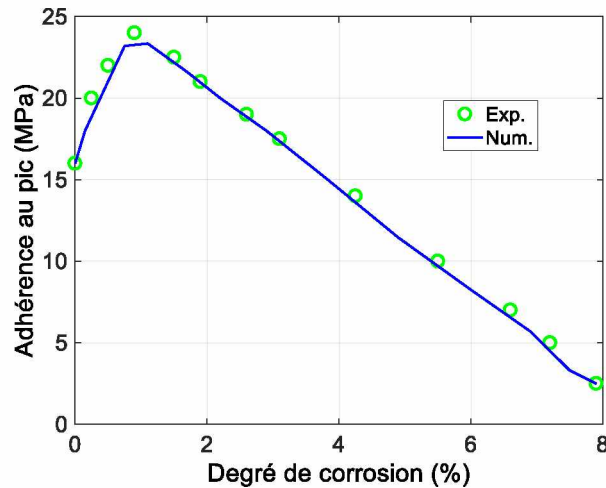
de corrosion. Par ailleurs, sur le plan mécanique, cet effet conditionnera à l'échelle de la structure le faciès de fissuration, en particulier l'espacement des fissures.

Figure 14 - Évolution de la contrainte normale à l'interface entre l'acier et le béton en présence de corrosion.



En dernier lieu, l'apparition des produits de corrosion conduit à une variation des propriétés de résistance de l'interface entre l'acier et le béton et en particulier de l'adhérence. Cela s'explique par le caractère expansif des produits de corrosion (cf. partie 1). De manière schématique, on distingue deux étapes. Lors de la première, les produits de corrosion exercent une pression sur le béton entourant l'armature en acier. Cette pression n'entraîne pas localement un dépassement de la limite en traction du béton et donc, par réaction, conduit à un confinement de l'interface. Ce confinement a pour effet d'améliorer l'adhérence entre l'acier et le béton. Toutefois, cette étape correspond à des degrés de corrosion très faibles (de l'ordre de 2 à 3 %). Lors de la seconde étape, la pression exercée par les produits de corrosion conduit à un dépassement de la limite en traction du béton. Par conséquent, la fissuration se développe et l'interface entre l'acier et le béton voit ses propriétés mécaniques diminuer. À titre illustratif, l'évolution de l'adhérence au pic de résistance en fonction du degré de corrosion est présentée sur la Figure 15 - .

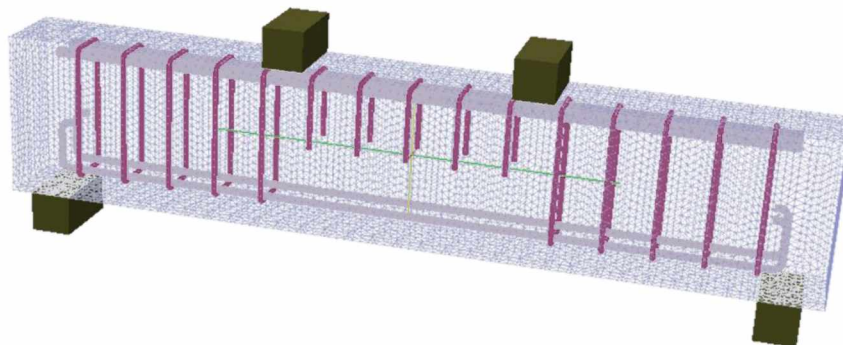
Figure 15 - Évolution de l'adhérence au pic en fonction de l'état de corrosion.



2.4.3 Conséquence mécanique structurale

L'approche 2D/3D permet de décrire de manière fine à l'échelle structurale l'ensemble des mécanismes qui apparaissent à l'échelle locale. En particulier, on peut citer la fissuration du béton du fait de l'expansion des produits de corrosion et la réduction de la ductilité du fait de la dégradation des aciers. À titre d'illustration, la campagne expérimentale réalisée sur une poutre chargée en flexion quatre points est considérée (cf. § 2.2.3.) [40]. Pour qu'elle puisse être mise en œuvre, l'approche 2D/3D s'appuie sur une description précise géométrique. Un exemple de maillage à l'aide d'éléments finis est présenté en Figure 16 - Le béton est décrit à l'aide d'éléments finis volumiques. De manière similaire, les armatures longitudinales et transversales sont également décrites à l'aide d'éléments finis volumiques. Cela est nécessaire afin de pouvoir décrire l'interface entre l'acier et le béton à l'aide d'éléments finis joints. Enfin, les patins de chargement, souvent considérés comme exhibant un comportement élastique linéaire, sont également intégrés à la modélisation.

Figure 16 - Maillage d'une poutre sujette à un chargement flexion quatre points – approche 2D/3D.



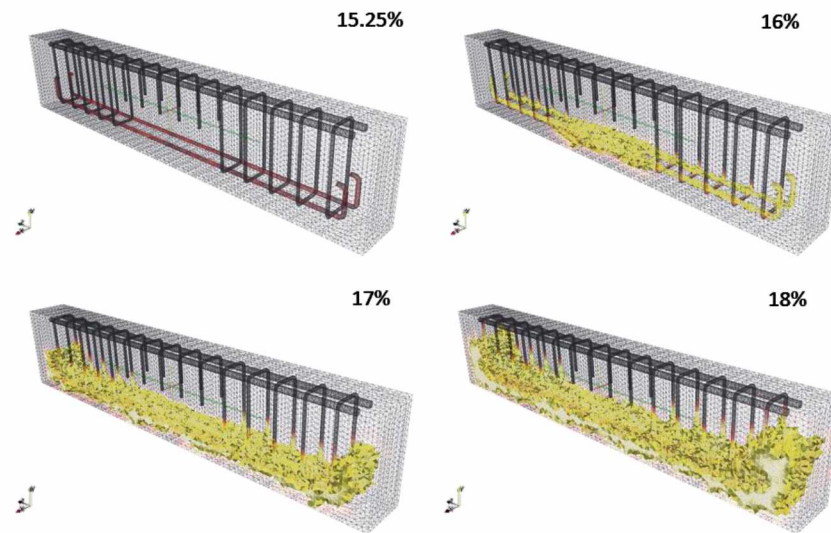
Le comportement du béton a été décrit selon la loi proposée par [51], l'acier selon la loi formulée par [47] et enfin, l'interface entre l'acier et le béton selon la loi issue des travaux de [44]. L'identification des paramètres a été réalisée pendant la campagne expérimentale [C6001] et [C6005]. L'approche 2D/3D a donc été mise en œuvre selon les deux étapes explicitée au paragraphe 2.4.1. La première étape consiste à reproduire l'état de corrosion. Pour cela, un gonflement est appliqué à l'interface entre l'acier et le béton pour décrire le caractère expansif des produits de corrosion. Ce gonflement a naturellement pour effet de fissurer le béton voisin de l'armature en acier

sujette au phénomène de corrosion. Sur la Figure 17 - plusieurs cartographies d'endommagement sont représentées. À noter toutefois que seul l'endommagement supérieur à 0,99 a été représenté afin de ne visualiser que les zones dans lesquelles des macrofissures se sont développées, les microfissures, quant à elles, ne sont pas représentées.

Nota : Si l'on considère qu'avec un modèle d'endommagement la macrofissuration peut être décrite, on ne représente classiquement que les isovaleurs d'endommagement élevé (par exemple 0,99 et 1) pour la visualiser. Les valeurs d'endommagement plus faibles sont généralement associées à la microfissuration.

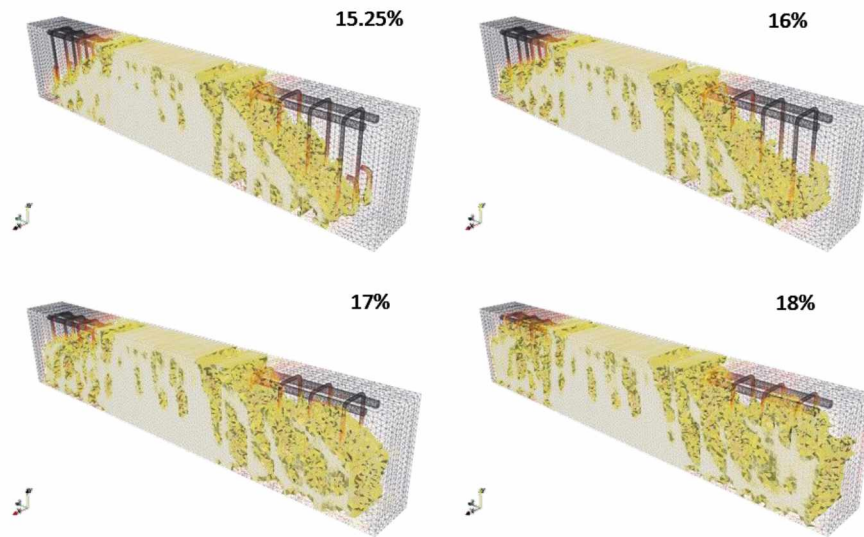
Il est possible d'observer, que plus le degré de corrosion macroscopique augmente, plus le béton entourant l'armature en acier s'endommage.

Figure 17 - Cartographie d'endommagement (seuil à 0,99) pour différents états d'avancement de la corrosion des armatures inférieures (15,25 ; 16 ; 17 et 18 %) – approche 2D/3D.



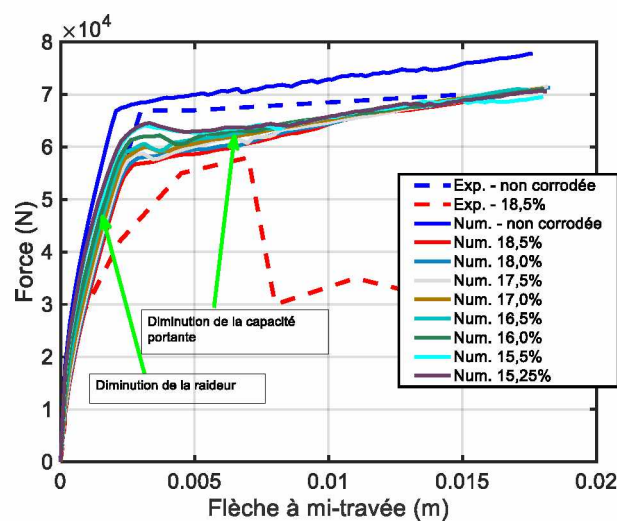
La seconde étape consiste à appliquer un chargement de type flexion quatre points, conformément au protocole d'essai considéré. Ce chargement a été appliqué en considérant la poutre en béton armé préalablement endommagée par le gonflement associé au développement des produits de corrosion. À ce stade, le gonflement est supposé fixe et il n'évolue plus pendant le chargement mécanique. Les cartographies d'endommagement obtenues aux différents niveaux de corrosion sont présentées à la Figure 18 - On peut observer deux zones : d'une part, une zone de moment (entre les patins d'application de chargement) constant dans laquelle les macrofissures qui se développent sont principalement verticales et, d'autre part, une zone dans laquelle le cisaillement prépondérant conduit naturellement à des macrofissures inclinées.

Figure 18 - Cartographie d'endommagement (seuil à 0,99) pour différents états d'avancement de la corrosion des armatures inférieures (15,25 ; 16 ; 17 et 18 %) et un même chargement mécanique – approche 2D/3D.



D'un point de vue plus quantitatif, les courbes de réaction ont été déterminées pour différents degrés de corrosion macroscopiques. Les résultats sont montrés sur la Figure 19 - . Ils décrivent la somme des réactions verticales calculées aux appuis en fonction de la flèche à mi-travée. Ces résultats montrent que le phénomène de corrosion décrit selon les principes exposés au paragraphe 2.4.2 conduit à plusieurs conséquences à l'échelle structurale. D'abord, la raideur initiale diminue bien en fonction du degré de corrosion. Cela s'explique par le fait que l'approche 2D/3D permet de prendre en compte un état d'endommagement initial. Cet effet n'aurait pas pu être décrit sans recourir à une modélisation locale de l'interface entre l'acier et le béton. Ensuite, la capacité portante tend à diminuer avec l'augmentation du degré de corrosion. Cet effet n'est néanmoins pas très significatif. Cela peut s'expliquer par le fait que seule une partie des armatures est sujette au phénomène de corrosion. Enfin, on peut noter que la ductilité d'ensemble diminue également du fait de la dégradation locale de l'acier.

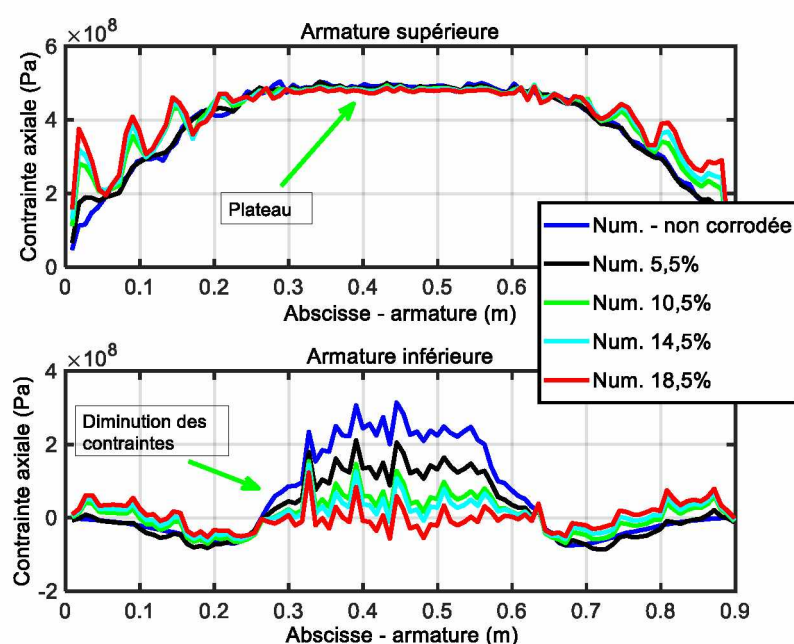
Figure 19 - Évolution de la capacité portante pour différents états d'avancement de corrosion des armatures inférieures – approche 2D/3D.



L'approche 2D/3D offre également la possibilité d'accéder à des quantités locales permettant d'analyser avec finesse les résultats obtenus. À titre d'exemple, la distribution des contraintes normales dans les armatures en acier pour une flèche à

mi-travée donnée et pour différents degrés de corrosion a été déterminée. Les résultats sont montrés sur la Figure 20 - et ils permettent d'analyser comment le transfert d'efforts entre l'acier et le béton s'effectue en présence de corrosion. Pour les armatures supérieures, la distribution des contraintes normales ne semble pas être affectée. Cela n'est pas étonnant puisque les armatures supérieures ne sont pas sujettes au phénomène de corrosion. En revanche, pour les armatures inférieures, le plateau de contrainte tend à diminuer. Cela peut s'expliquer par le fait que plus le degré de corrosion augmente, plus l'adhérence entre l'acier et le béton diminue. Ainsi, le transfert d'efforts, qui tend à ne plus s'effectuer, rend globalement la poutre moins résistante du fait de la diminution de la section résistante globale.

Figure 20 - Distribution spatiale des contraintes dans les armatures supérieure et inférieure pour différents états de corrosion – approche 2D/3D.



À retenir

- La corrosion peut être modélisée à l'échelle structurale par trois types d'approches : 0D, 1D et 2D/3D.
- L'approche 0D est peu coûteuse en temps de calcul et décrit la réduction de ductilité globale.
- L'approche 1D est modérément coûteuse en temps de calcul et décrit la réduction de ductilité globale et les variations d'adhérence.
- L'approche 2D/3D est coûteuse en temps de calcul et décrit la réduction de ductilité globale, les variations d'adhérence et la diminution de la raideur initiale.

3 Application structurale : poutre sujette à un chargement de flexion quatre points

3.1 Description du protocole expérimental

Afin d'évaluer les capacités des modèles proposés à bien décrire le comportement mécanique ultime des éléments de structure en béton armé corrodés, des essais de flexion quatre points avec chargement monotone réalisés sur des poutres en béton

armé corrodées ont été étudiés [25]. Un total de 111 poutres en béton armé a été fabriqué de manière industrielle. Elles ont été soumises à un procédé intensiostatique pour créer un état initial de corrosion. Pour cela, deux sources de courant externes ont été considérées.

Le degré de corrosion macroscopique a été défini comme étant égal au rapport $\frac{2RT}{D}$, où R est la vitesse de corrosion en mm.année^{-1} , T est la durée (en années) et D est le diamètre nominal des aciers longitudinaux. Les poutres ont été volontairement sous-renforcées en vue de garantir que la rupture globale soit conditionnée par la rupture locale de l'interface entre l'acier et le béton ou, autrement dit, par la perte d'adhérence entre l'acier et le béton. Les éprouvettes ont une forme prismatique de 910 mm, une section droite de 150 mm de profondeur et de 100 mm de largeur. Chaque poutre a été renforcée en partie inférieure avec deux aciers longitudinaux ayant un diamètre égal à 10 mm. Des cadres ont été également considérés dans certaines poutres pour quantifier leur effet mécanique sur le comportement global. La présence de ces cadres a interféré avec la phase d'initiation de la corrosion, car il fut délicat de les isoler électriquement des aciers longitudinaux. En effet, cette condition d'isolation a été requise afin d'assurer une certaine homogénéité de la corrosion le long des aciers inférieurs. La même remarque au sujet des aciers supérieurs a été formulée par les auteurs, ainsi aucun acier supérieur n'a été considéré.

3.2 Description de la modélisation numérique

Pour valider le modèle d'interface entre l'acier et le béton proposé en présence de corrosion, deux types d'approche ont été retenues : d'une part, une approche 1D et, d'autre part, l'approche 2D/3D. Conformément aux principes exposés aux paragraphes 2.3.1 et 2.4.1, l'approche 1D consiste à réaliser une modélisation multifibre [C6002] avec interface imparfaite tandis que l'approche 2D/3D s'appuie sur une modélisation tridimensionnelle d'un quart de poutre. Le comportement à rupture en présence de corrosion est l'aspect qui est spécifiquement étudié de manière quantitative. Toutefois, aucune information relative au faciès de fissuration obtenu après les essais de flexion n'a été fournie.

Pour l'approche 1D, une modélisation multifibre de la poutre entière a été réalisée. Le maillage comporte 30 éléments poutre de type Timoshenko. Les fibres de béton suivent la loi proposée par [41] et l'acier est représenté par un modèle élasto-plastique avec écrouissage non linéaire [15]. Les paramètres matériaux de ce modèle ont été identifiés d'après l'étude de sensibilité réalisée par [15]. L'interface entre l'acier et le béton est prise en compte selon l'approche 1D dont les principes ont été évoqués au paragraphe 2.3.1. Les paramètres matériaux liés à l'interface entre l'acier et le béton ont été identifiés par analyse inverse car aucune information n'est fournie au sujet de l'adhérence. Les calculs ont été contrôlés en déplacement imposé pour améliorer leur robustesse numérique.

En ce qui concerne l'approche 2D/3D, des éléments de type cube à 8 nœuds ont été utilisés pour décrire le domaine occupé par le béton ainsi que l'armature. L'interface entre l'acier et le béton a été modélisée à l'aide d'éléments d'interface tridimensionnels sans épaisseur. Une représentation du maillage est donnée sur les Figure 21 - et Figure 22 - L'acier est supposé suivre la loi proposée par [15] sous sa version tridimensionnelle ; le béton, quant à lui, a été modélisé par le modèle de Mazars [52] dans sa version non locale et l'interface entre l'acier et le béton à l'aide de la loi proposée par [44]. Le choix d'utiliser un modèle de béton de référence a été pris pour que ce cas test ne soit discriminant que par rapport à la loi d'interface entre l'acier et le béton proposée. L'ensemble des paramètres matériaux a été identifié grâce aux

données fournies, à l'exception de ceux liés à la prise en compte de la corrosion. Les paramètres liés à la réduction de l'adhérence entre l'acier et le béton ont été identifiés par analyse inverse. La réduction de la section d'acier a été prise en compte de manière explicite en modifiant le diamètre initial de l'armature longitudinale. Les résultats sont présentés dans ce qui suit, d'abord pour la poutre saine (témoin) puis, pour les poutres corrodées. Il doit être noté que pour la poutre saine, une interface imparfaite a été considérée. Les calculs ont été contrôlés en déplacement imposé sur un patin d'application de charge supposée élastique rigide. Une importante sensibilité au maillage a été constatée.

Figure 21 - Maillage d'un quart d'une des poutres en béton armé testée par [25] – vue de l'intérieur.

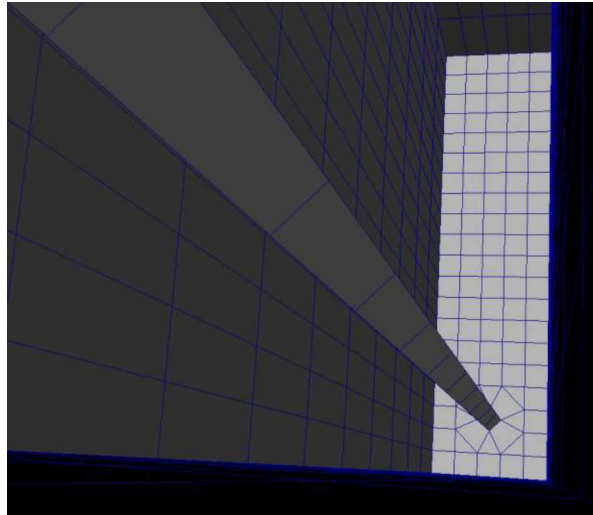
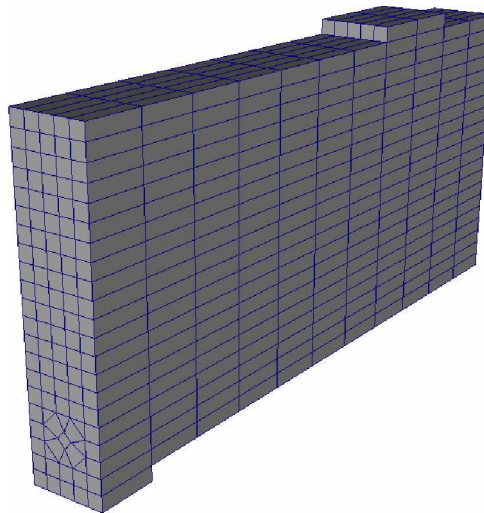


Figure 22 - Maillage d'un quart d'une des poutres en béton armé testée par [25] – vue de l'extérieur.



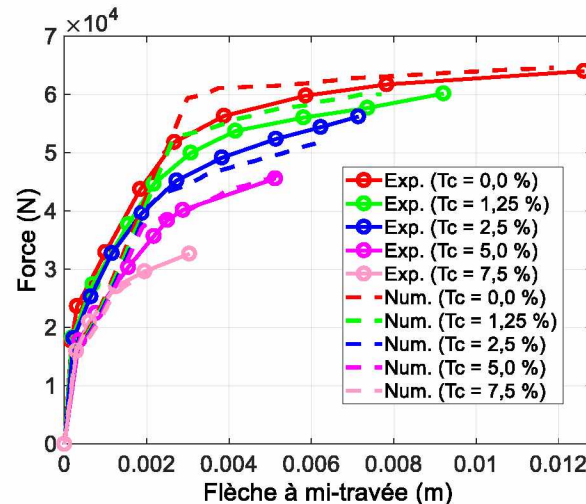
3.3 Résultats

3.3.1 Approche 1D

Les résultats quantitatifs obtenus en termes de force/déplacement sont présentés sur la Figure 23 - D'une manière générale, les résultats numériques obtenus grâce à l'approche simplifiée sont cohérents avec les données expérimentales. En effet, les différentes étapes de chargement des éléments de structure sont bien décrites et ce, pour les différents degrés de corrosion considérés. Il doit être noté toutefois que les

paramètres matériaux liés à la prise en compte de la corrosion ont été identifiés par analyse inverse, c'est-à-dire, que certains ont été calés pour retrouver les résultats expérimentaux. Néanmoins, certaines des valeurs identifiées pourraient être réutilisées pour étudier d'autres éléments de structure aux propriétés mécaniques comparables. Un autre aspect qui doit être mentionné est que le temps de calcul nécessaire à l'obtention des réponses numériques pour l'ensemble de l'élément de structure reste bien inférieur à ceux requis lorsque des approches 2D/3D sont conduites. Le maillage est également plus simple à réaliser en raison du caractère intégré de l'interface.

Figure 23 - Évolution de la capacité portante de poutres en béton armée en fonction de la flèche à mi-travée – approche 1D.



3.3.2 Approche 2D/3D

3.3.2.1 Poutre saine

Les résultats quantitatifs acquis pour la poutre saine sont présentés sur les Figure 24 - , Figure 25 - et Figure 26 - . Elles présentent, respectivement, la courbe de réaction de la poutre saine (valeurs expérimentales et calculées), la distribution des contraintes normales dans les armatures inférieures de la poutre saine pour différents chargements et la distribution de l'adhérence à l'interface entre l'acier et le béton de la poutre saine, pour différents chargements.

En premier lieu, la courbe force/déplacement obtenue numériquement est en adéquation avec celle mesurée expérimentalement (Figure 24). Elle présente toutefois une discontinuité lors du passage de la phase élastique à la phase où la fissuration du béton est prépondérante. Cela est dû à l'apparition d'une fissure isolée au droit du patin d'application des charges. La suite du calcul se déroule comme attendu après ce point particulier (redistribution des contraintes dans le béton).

En second lieu, les contraintes de Von Mises calculées le long de l'armature pour différents niveaux de charges décrivent bien le mécanisme de plastification de l'armature (Figure 25). La zone plastique est initiée au centre de la poutre et se propage vers les extrémités. Ce mécanisme est caractéristique de ce type d'élément de structure chargé en flexion.

Enfin, la distribution des contraintes de cisaillement le long de l'armature montre que la zone la plus sujette à un glissement est celle proche de l'appui à l'extrémité (Figure

26). En effet, cela s'explique par des raisons de symétrie. En zone centrale, un très faible glissement apparaît à l'interface entre l'acier et le béton alors que, loin de cette zone, le glissement est plus prononcé. En l'absence de glissement, aucune contrainte de cisaillement ne peut apparaître. Cela explique pourquoi les contraintes de cisaillement en zone centrale sont quasi nulles.

Figure 24 - Courbe de réaction – poutre saine - approche 2D/3D.

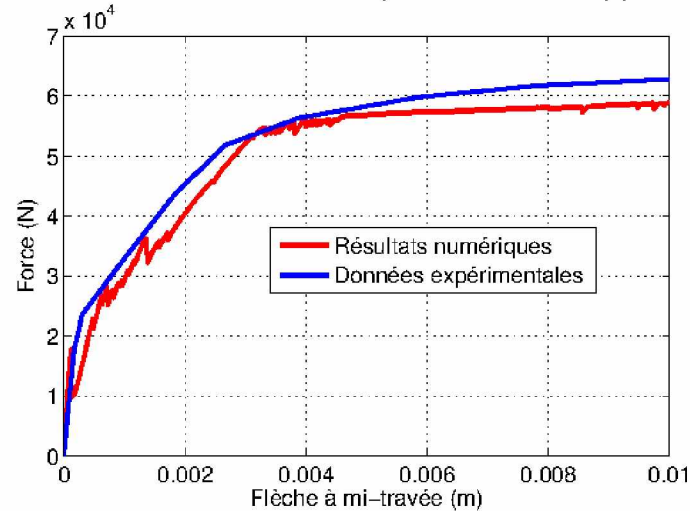


Figure 25 - Distribution des contraintes normales dans les armatures inférieures – poutre saine - approche 2D/3D.

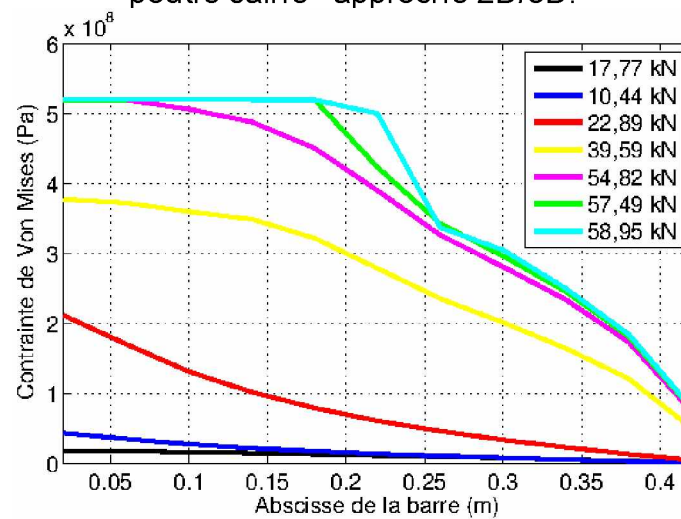
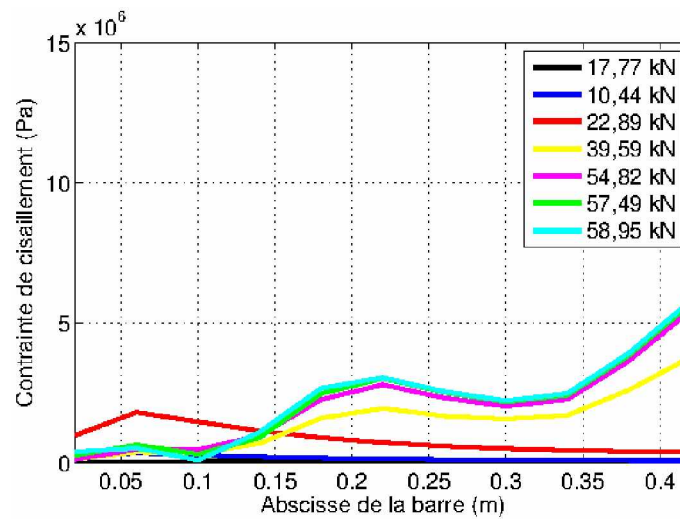


Figure 26 - Distribution de l'adhérence à l'interface entre l'acier et le béton – poutre saine - approche 2D/3D.



3.3.2.2 Poutres corrodées

D'une simulation à l'autre, l'ensemble des paramètres a été maintenu constant à l'exception, d'une part, du diamètre l'armature et, d'autre part, du degré de corrosion macroscopique. Les courbes de réaction sont présentées de la Figure 27 - à la Figure 29 - D'une manière générale, l'adéquation avec les données expérimentales est satisfaisante. Néanmoins, il peut être noté, dans le cas de forts degrés de corrosion, non seulement que la raideur initiale est mal estimée, mais aussi que les instabilités numériques deviennent plus importantes. Le fait que la raideur initiale soit mal estimée peut être rapproché du fait que le maillage considéré est relativement grossier. Par ailleurs, l'augmentation des instabilités numériques avec le degré de corrosion peut être rapprochée, quant à elle, au fait que l'adhérence devient assez faible. Cela crée donc une difficulté supplémentaire d'ordre numérique pour trouver l'état d'équilibre global.

Figure 27 - Courbe de réaction – poutre corrodée à 1,25 % - approche 2D/3D.

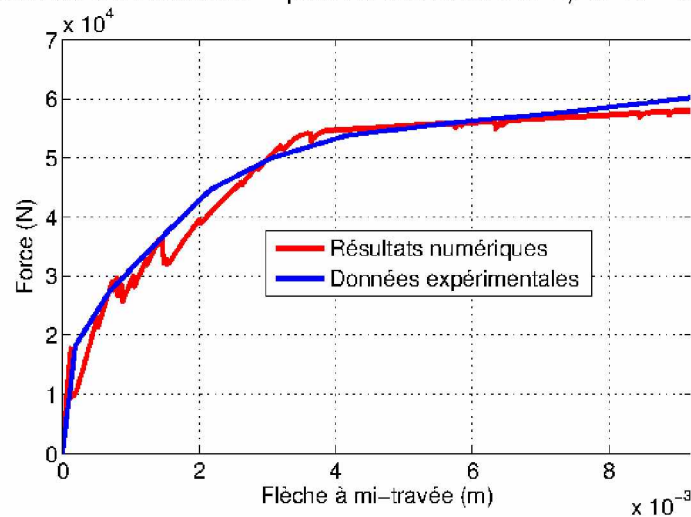


Figure 28 - Courbe de réaction – poutre corrodée à 3,75 % - approche 2D/3D.

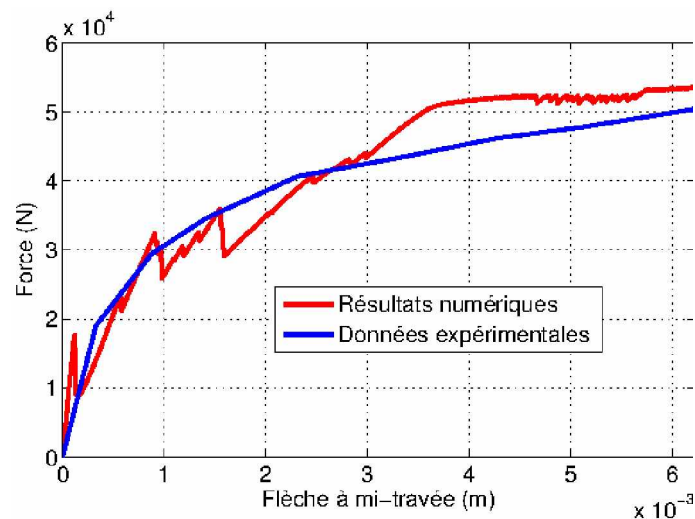
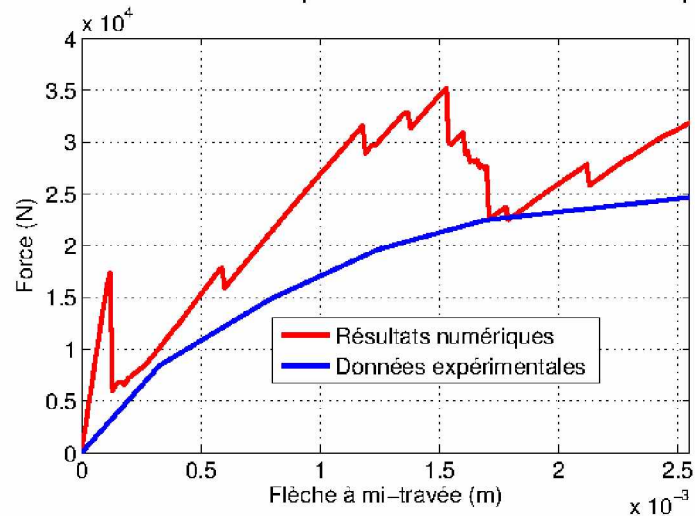


Figure 29 - Courbe de réaction – poutre corrodée à 10 % - approche 2D/3D.



Les distributions des contraintes de Von Mises sont présentées de la Figure 30 - à la Figure 32 - pour différents degrés de corrosion. Plus le degré de corrosion augmente, moins l'armature entre en plasticité. En effet, cela peut se vérifier en observant que plus le degré de corrosion augmente, plus le transfert d'efforts entre l'acier et le béton devient dégradé et donc, les contraintes dans les armatures deviennent plus faibles. Cela peut s'expliquer par le fait que l'adhérence entre l'acier et le béton devenant de moins en moins importante, le transfert des contraintes, depuis le béton vers l'acier, peut de moins en moins s'effectuer. Cela entraîne donc une difficulté pour l'armature à se charger et, par conséquent, à entrer en plasticité. Autrement dit, les résultats numériques montrent le passage d'un mode de rupture de type béton armé (avec plastification des aciers) à un mode de rupture de type béton non armé (sans plastification des aciers). Les ancrages n'ont pas été pris en compte dans le modèle. En effet, si ces derniers avaient été pris en compte, un palier plastique aurait été constaté numériquement car les efforts auraient transité depuis l'acier des ancrages vers le béton.

Figure 30 - Distribution des contraintes normales dans les armatures inférieures – poutre corrodée à 1,25 % - approche 2D/3D.

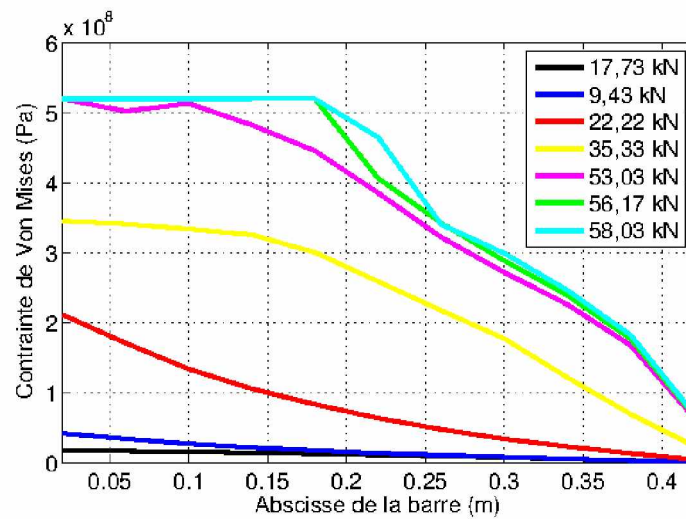


Figure 31 - Distribution des contraintes normales dans les armatures inférieures – poutre corrodée à 3,75 % - approche 2D/3D.

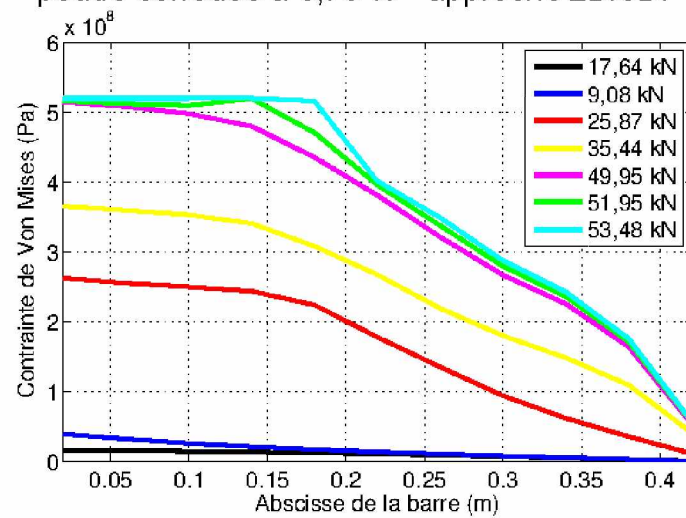
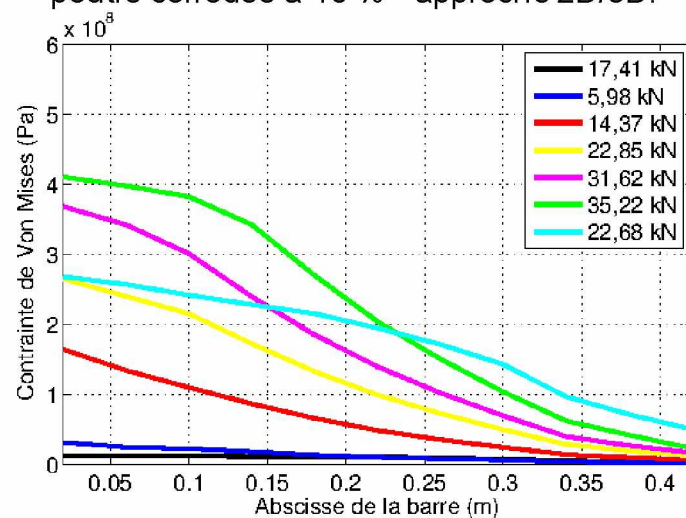


Figure 32 - Distribution des contraintes normales dans les armatures inférieures – poutre corrodée à 10 % - approche 2D/3D.



Les distributions des contraintes de cisailement à l'interface sont exposées de la Figure 33 - à la Figure 35 - D'une part, à l'identique du cas de la poutre saine précédemment présenté, le glissement apparaît essentiellement aux extrémités. D'autre part, le glissement tend à devenir quasi uniforme (pour un niveau de charge

donné) lorsque le degré de corrosion augmente. Cela provient du fait que, plus le degré de corrosion est élevé, plus l'endommagement initial à l'interface entre l'acier et le béton est important. Par suite, l'armature devient de moins en moins adhérente au béton, le glissement ainsi que la contrainte de cisaillement à l'interface entre l'acier et le béton deviennent donc homogènes.

Figure 33 - Distribution de l'adhérence à l'interface entre l'acier et le béton – poutre corrodée à 1,25 % - approche 2D/3D.

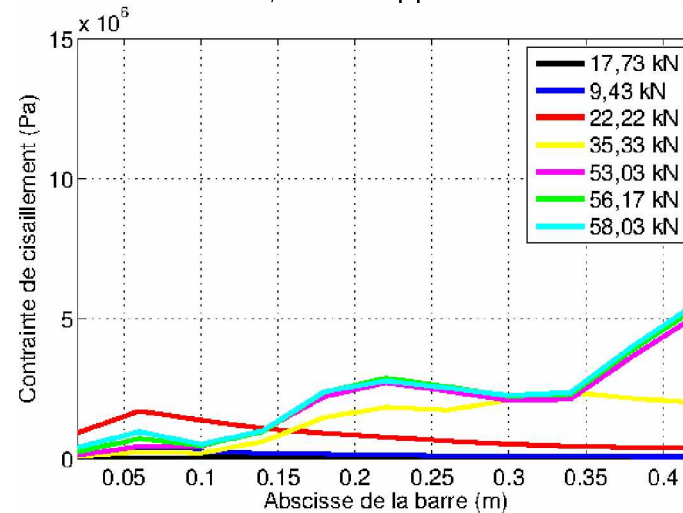


Figure 34 - Distribution de l'adhérence à l'interface entre l'acier et le béton – poutre corrodée à 3,75 % - approche 2D/3D.

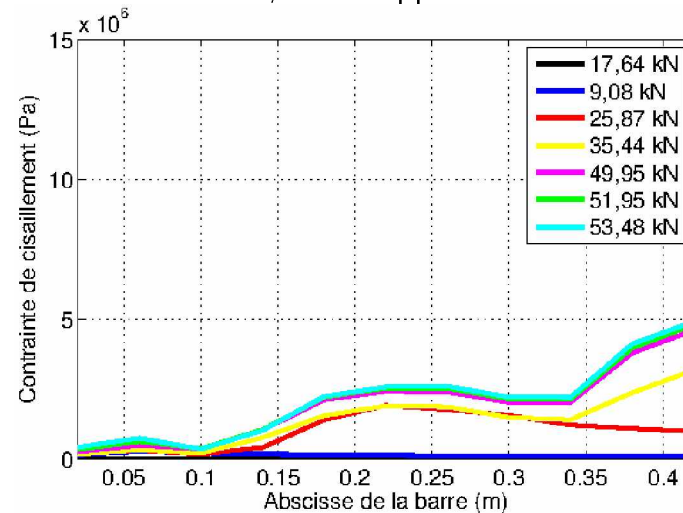
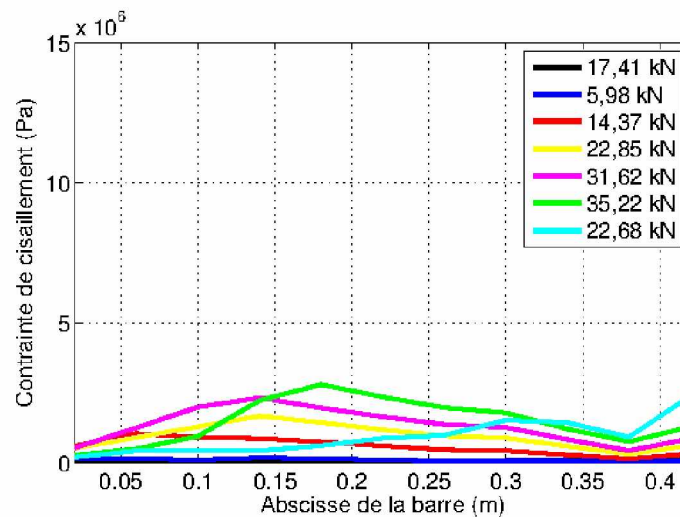


Figure 35 - Distribution de l'adhérence à l'interface entre l'acier et le béton – poutre corrodée à 10 % - approche 2D/3D.



À retenir

- Les approches 1D et 2D/3D permettent d'aboutir à des résultats similaires à l'échelle structurale.
- La détermination des paramètres des lois de comportement nécessite la réalisation d'essais d'accompagnement non classiques en présence de corrosion quelle que soit l'approche considérée.
- L'approche 2D/3D permet d'accéder à des résultats locaux, ce qui peut être utile pour modifier localement une disposition constructive si nécessaire.

4 Conclusion

Cet article présente des éléments de connaissance pour permettre de mieux évaluer le comportement d'éléments de structure en béton armé en présence de corrosion des armatures. Il rappelle l'origine des mécanismes physico-chimiques responsables du phénomène de corrosion des armatures présentes dans le béton armé, donne une vision globale des approches de modélisation du comportement des éléments de structure de génie civil atteints de corrosion et enfin, présente une étude comparative entre deux approches de modélisation sur la base d'un élément de structure simple.

Dans une première partie, quelques éléments ont été présentés pour permettre de bien distinguer les deux cas de corrosion couramment rencontrés dans le domaine du génie civil : la corrosion par carbonatation et la corrosion par chlorures. Dans le cas de la carbonatation ou encore corrosion généralisée, la corrosion a tendance à apparaître de manière uniforme le long des armatures en acier alors que dans le cas des chlorures, il est courant d'observer des piqûres localisées susceptibles de conduire à une rupture locale de l'armature. Dans une seconde partie, les principales approches permettant de prendre en compte le phénomène de corrosion dans des simulations numériques ont été présentées. Après une brève revue de la littérature, trois classes d'approches ont été exposées et illustrées.

L'approche 0D permet de décrire simplement l'effet de la corrosion sur la ductilité globale de l'élément de structure analysé. Sa simplicité de mise en œuvre rend cette approche plutôt courante. L'approche 1D, plus coûteuse en temps de calcul et plus exigeante en termes d'identification de paramètres matériaux, permet de décrire avec finesse les variations d'adhérence entre l'acier et le béton en présence de corrosion. Enfin, l'approche 2D/3D a été illustrée. Cette dernière approche est de loin la plus coûteuse en temps de calcul et la plus délicate à mettre en œuvre à bien des égards. Toutefois, elle permet d'accéder à des quantités locales d'intérêt inaccessibles à l'aide

des autres approches exposées. Ainsi, une étude comparative sur la base d'une même campagne expérimentale des approches 1D et 2D/3D est présentée.

Plusieurs questions émergent. Parmi elles, on peut citer d'une part la problématique de l'identification des paramètres, qui peuvent être souvent nombreux, peu physiques, mais néanmoins nécessaires lorsque des lois de comportement fines sont utilisées, ou d'autre part, la validation/vérification des modèles utilisés et le niveau de confiance qui peut leur être associé.

La **validation** est l'action qui consiste à évaluer l'écart entre les résultats d'un modèle conceptuel et des observations in-situ.

La **vérification** est l'action qui consiste à évaluer l'exactitude de mise en œuvre (implantation numérique) d'un modèle conceptuel.

En matière d'identification, on assiste depuis plusieurs années au développement du champ disciplinaire de l'expérimentation numérique. Ce dernier a pour ambition de substituer aux essais d'accompagnement, une batterie de simulations numériques, s'appuyant sur les techniques numériques fines et applicables à l'échelle du volume élémentaire représentatif. Au cours des prochaines années, ce type d'approches pourrait être déployé pour traiter des cas de structures complexes et ainsi, permettre de disposer de bases de données exploitables en vue d'identifier un large spectre de paramètres matériaux.

5 Glossaire

- **confinement** ; *confinement*

Sollicitations appliquées à un matériau entraînant un état de compression multiaxiale en son sein.

- **ductilité** ; *ductility*

La ductilité désigne la capacité d'un béton à être étiré, étendu, courbé ou déformé sans se rompre.

- **effet d'hystérésis** ; *hysteretic effect*

Persistance d'un effet après en avoir éliminé la cause se caractérisant par une dissipation d'énergie avec présence de boucles dans la courbe de réponse du matériau.

- **endommagement** ; *damage*

Comportement mécanique non linéaire d'un matériau se caractérisant par le développement de microfissures au sein du milieu et une diminution de la raideur du matériau.

- **enrobage** ; *cover*

Épaisseur de béton (généralement de 2,5 à 4 cm en bâtiment) entre une armature et la peau de la paroi coulée, qui permet d'assurer la protection contre la corrosion du ferrailage.

- **expérimentation numérique** ; *virtual testing*

Technique d'identification fondée sur la substitution d'éprouvettes physiques par des éprouvettes numériques.

- **fiabilité** ; *reliability*

La fiabilité peut être définie comme le complémentaire de la probabilité de défaillance

est un moyen de mesurer le degré de sécurité de l'ouvrage.

- loi de comportement ; *constitutive relation*

Modèle mathématique décrivant les interactions entre la sollicitation et la réponse d'un matériau ou d'une structure à cette sollicitation.

- élasticité ; *elasticity*

Comportement mécanique d'un matériau par lequel ce dernier retrouve sa forme d'origine lorsqu'on le soustrait à la sollicitation à laquelle il est soumis.

- identification ; *identification*

Action ayant pour objectif la détermination de paramètres.

- méthode des éléments finis ; *finite element method*

Méthode numérique de description approchée d'un champ continu dans un milieu permettant la détermination de celui-ci par résolution des équations aux dérivées partielles dont il est solution.

- plasticité ; *plasticity*

Comportement mécanique non linéaire d'un matériau se caractérisant par le développement de déformations irréversibles.

6 Sigles, notations et symboles

Symbole	Description	Unité
Fe	Elément fer	-
e^-	Charge électronique élémentaire	-
OH^-	Ion OH^-	-
H_2O	Molécule d'eau	-
H^+	Ion hydrogène	-
O_2	Molécule de dioxygène	-
CO_2	Molécule de dioxyde de carbone	-
R	Fonction d'écrouissage isotrope	Pa
r	Variable d'écrouissage	m/m
A	Paramètre d'écrouissage	-
m	Exposant d'écrouissage	-
p	Déformation plastique cumulée	m/m
ε^p	Déformation plastique	m/m
D	Variable d'endommagement	-
D_c	Variable d'endommagement limite	-
p_D	Déformation plastique cumulée au-delà de laquelle l'endommagement est activé	m/m
p_R	Déformation plastique cumulée au-delà de laquelle l'acier est supposé rompre	m/m
ε_R	Déformation à rupture	m/m
T_c	Degré de corrosion macroscopique	%
ε	Déformation totale	m/m
λ	Facteur de partition	-
σ	Contrainte de Cauchy uniaxiale	Pa
S_a	Section d'acier	m ²
S_{int}	Section extérieure à l'armature	m ²

x	Abscisse courante le long d'une armature	m
τ	Contrainte de cisaillement à l'interface entre l'acier et le béton ou encore adhérence	Pa
l_{int}	Longueur d'ancrage	m

Comportement des structures en béton armé existantes

Corrosion des armatures

par

Dr Benjamin RICHARD, HDR, Ing.

Chef du Laboratoire de Modélisation et d'Analyse de la Performance des Structures

Président du Comité Scientifique et Technique de l'Association Française de Génie Parasismique

IRSN, 31 avenue du Général Leclerc, F-92260, Fontenay aux Roses, France

Sources bibliographiques

- [1] Longuet, P. (1976). La phase liquide du ciment hydraté. *Revue du Mater. Constr.*, 676:35-41.
- [2] Sandberg, P. (1995). Critical evaluation of factors affecting chloride initiated reinforcement corrosion in concrete. University of Lund, Lund Institute of Technology, Division of Building Materials.
- [3] Sagoe-Crentsil, K. K., & Glasser, F. P. (1990). Analysis of the Steel/Concrete Interface. *Corrosion of Reinforcement in Concrete*, 74-86.
- [4] Tuutti, K. (1982). Corrosion of steel in concrete. *Cement-och betonginst.*
- [5] Broomfield, J. P. (1997). Corrosion of steel in concrete: Understanding. Investigation and Repair, E&FN, London, 1-15.
- [6] Raharinaivo, A., Arliguie, G., Chaussadent, T., Grimaldi, G., Pollet, V., & Tache, G. (1998). La corrosion et la protection des aciers dans le béton, Collection du laboratoire central des ponts et chaussées.
- [7] Chitty, W. J., Dillmann, P., L'Hostis, V., & Lombard, C. (2005). Long-term corrosion resistance of metallic reinforcements in concrete—a study of corrosion mechanisms based on archaeological artefacts. *Corrosion Science*, 47(6), 1555-1581.
- [8] Chitty, W. J., Berger, P., Dillmann, P., & L'Hostis, V. (2008). Long-term corrosion of rebars embedded in aerial and hydraulic binders—Mechanisms and crucial physico-chemical parameters. *Corrosion Science*, 50(8), 2117-2123.
- [9] La corrosion et l'altération des matériaux dans l'aval du cycle du combustible. Rapport CEA.
- [10] Baron, J., & Leroy, P. (1998). Corrosion des métaux ferreux dans l'eau: Protection par dépôts de carbonate de calcium. *GWA. Gas, Wasser, Abwasser*, 78(8), 629-635.
- [11] Neville, A. (1983). Corrosion of reinforcement. *Concrete*, 17(6).
- [12] Angst, U., Elsener, B., Larsen, C. K., & Vennesland, Ø. (2009). Critical chloride content in reinforced concrete—a review. *Cement and concrete research*, 39(12), 1122-1138.
- [13] Almusallam, A. A., Al-Gahtani, A. S., & Aziz, A. R. (1996). Effect of reinforcement corrosion on bond strength. *Construction and building materials*, 10(2), 123-129.
- [14] Castel, A., François, R., & Arliguie, G. (2001). Modèle de comportement mécanique des poutres en béton armé après fissuration. *Revue française de génie civil*, 5(5), 527-551.
- [15] Ouglova, A. (2004). Etude du comportement mécanique des structures en béton armé atteintes par la corrosion (Doctoral dissertation, Cachan, Ecole normale supérieure).
- [16] Rodriguez, J., Ortega, L. M., Munoz, F., & Garcia, A. M. (1998). Corrosion des

- armatures et durée de service des constructions en béton. In Diagnostic des ouvrages en béton armé (état-méthodes-prévisions du vieillissement, Saint Rémy lès Chevreuse, 12-13 octobre 1998) (pp. 117-128).
- [17] Cairns, J., Du, Y., & Law, D. (2007). Influence of corrosion on the friction characteristics of the steel/concrete interface. *Construction and Building Materials*, 21(1), 190-197.
 - [18] Al-Sulaimani, G. J., Kaleemullah, M., & Basunbul, I. A. (1990). Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. *Structural Journal*, 87(2), 220-231.
 - [19] Kashani, M. M., Crewe, A. J., & Alexander, N. A. (2017, March). Structural capacity assessment of corroded RC bridge piers. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering* (Vol. 170, No. 1, pp. 28-41). Thomas Telford Ltd.
 - [20] Val, D. V., Stewart, M. G., & Melchers, R. E. (1998). Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges. *Engineering structures*, 20(11), 1010-1019.
 - [21] Richard, B., Epailard, S., Cremona, C., Elfgren, L., & Adelaide, L. (2010). Nonlinear finite element analysis of a 50 years old reinforced concrete trough bridge. *Engineering Structures*, 32(12), 3899-3910.
 - [22] Cabrera, J. G., & Ghoddoussi, P. (1992, October). The effect of reinforcement corrosion on the strength of the steel/concrete bond. In *International conference on bond in concrete* (p. 10). CEB Riga, Latvia.
 - [23] Lee, H. S., Kage, T., Noguchi, T., & Tomosawa, F. (1999). The evaluation of flexural strength of RC beams damaged by rebar corrosion. In *Proc., 8th Int. Conf. on Durable Building Materials and Components* (pp. 320-330).
 - [24] Cabrera, J. G., & Al-Hasan, A. S. (1997). Performance properties of concrete repair materials. *Construction and Building Materials*, 11(5-6), 283-290.
 - [25] Mangat, P. S., & Elgarf, M. S. (1999). Flexural strength of concrete beams with corroding reinforcement. *Structural Journal*, 96(1), 149-158.
 - [26] Mangat, P. S., & Elgarf, M. S. (1999). Strength and serviceability of repaired reinforced concrete beams undergoing reinforcement corrosion. *Magazine of concrete research*, 51(2), 97-112.
 - [27] Ting, S. (1991). The effects of corrosion on the reliability of concrete bridge girders. Thèse de doctorat. University of Michigan.
 - [28] Castel, A., François, R., & Arliguie, G. (2002). Mechanical model of reinforced concrete damaged by steel corrosion. *Comptes Rendus Mécanique*, 330(1), 45-50.
 - [29] Lundgren, K., Kettli, P., Hanjari, K. Z., Schlune, H., & Roman, A. S. S. (2012). Analytical model for the bond-slip behaviour of corroded ribbed reinforcement. *Structure and Infrastructure Engineering*, 8(2), 157-169.
 - [30] Cremona, C., & Houde, M. J. (2007). Modélisation déterministe et probabiliste du comportement mécanique simplifié des corps d'épreuve. *Revue européenne de génie civil*, 11(1-2), 233-255.
 - [31] Coronelli, D. (2002). Corrosion cracking and bond strength modeling for corroded bars in reinforced concrete. *Structural Journal*, 99(3), 267-276.
 - [32] Coronelli, D., & Gambarova, P. (2004). Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines. *Journal of structural engineering*, 130(8), 1214-1224.
 - [33] Cairns, J. (1996). Alternative strategies for temporary support during structural repair of reinforced-concrete beams. *Journal of Structural Engineering*, 122(3), 238-246.
 - [34] Berto, L., Simioni, P., & Sabetta, A. (2008). Numerical modelling of bond behaviour in RC structures affected by reinforcement corrosion. *Engineering Structures*, 30(5), 1375-1385.
 - [35] Lundgren, K. (2001). Bond between corroded reinforcement and concrete. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden. Report No. 00, 3, 2001.

- [36] Lundgren, K. (2002). Modelling the effect of corrosion on bond in reinforced concrete. Magazine of Concrete Research, 54(3), 165-173.
- [37] Lundgren, K. (2005). Bond between ribbed bars and concrete. Part 2: The effect of corrosion. Magazine of Concrete Research, 57(7), 383-395.
- [38] Roux, J. (2009). Pratique de l'eurocode 2. Editions Eyrolles.
- [39] Lemaitre, J., Chaboche, J. L., Benallal, A., & Desmorat, R. (1985). Mécanique des matériaux solides (Vol. 2). Paris: Dunod.
- [40] Nguyen Q.T., Ragueneau F., Reviron N. & Berthaud Y., 2006. Prédiction du comportement à rupture de structures en béton armé corrodées : Essais / Calculs, 24^{ème} rencontre universitaire de Génie Civil, AUGC 06, La grande Motte, 1- 2 juin 2006.
- [41] Richard, B., Ragueneau, F., Adelaide, L., & Cremona, C. (2011). A multi-fiber approach for modeling corroded reinforced concrete structures. European Journal of Mechanics - A/Solids, 30(6), 950-961.
- [42] Combescure, D., Wang, F., 2007. Assesments of existing RC structures under severe dynamic loading using non linear modeling. In: CONSEC 07, Tours, France.
- [43] Wang, F., Lavarenne, S., Chaudat, T., Combescure, D., Payen, T., Fouré, B., 2007. Simulation analysis of static and shaking table tests on RC columns with insufficient lap splices. In: SMIRT 19th Conference, Toronto, Canada.
- [44] Richard, B., Ragueneau, F., Cremona, C., Adelaide, L., & Tailhan, J. L. (2010). A three-dimensional steel/concrete interface model including corrosion effects. Engineering Fracture Mechanics, 77(6), 951-973.
- [45] Ragueneau, F. (1999). Fonctionnement dynamique des structures en béton: influence des comportements hystériques locaux (Doctoral dissertation, Cachan, Ecole normale supérieure).
- [46] Richard, B., Ragueneau, F., Cremona, C., & Adelaide, L. (2010). Isotropic continuum damage mechanics for concrete under cyclic loading: Stiffness recovery, inelastic strains and frictional sliding. Engineering Fracture Mechanics, 77(8), 1203-1223.
- [47] Menegotto, M., & Pinto, P. E. (1977). Slender RC compressed members in biaxial bending. Journal of the Structural Division, 103(3).
- [48] La Borderie, C., Pijaudier-Cabot, G. (1992). Influence of the state of the stress in concrete on the behaviour of steel concrete interface. Concrete fracture mechanics of structures, Colorado, USA.
- [49] Clément, J. L. (1987). Interface acier-béton et comportement des structures en béton armé: Caractérisation, Modélisation (Doctoral dissertation, Paris 6).
- [50] Xu, G., Liu, L., Bao, H., Wang, Q., & Zhao, J. (2017). Mechanical properties of steel corrosion products in reinforced concrete. Materials and Structures, 50(2), 115.
- [51] Vassaux, M., Richard, B., Ragueneau, F., & Millard, A. (2015). Regularised crack behaviour effects on continuum modelling of quasi-brittle materials under cyclic loading. Engineering Fracture Mechanics, 149, 18-36.
- [52] Mazars, J. (1984). Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure. Thèse de Docteur es Sciences, Université Pierre et Marie Curie-Paris 6.

À lire également dans nos bases

L'HOSTIS Valérie, RAHARINAIVO André, TACHÉ Guy. *Corrosion des armatures dans les bétons – Mécanismes*. [COR407] (2016).

CAPRA Bruno. *Corrosion des structures en béton armé*. [C6151] (2014)

GIRY Cédric, RICHARD Benjamin. *Apports des lois constitutives non-linéaires en génie civil - Problématiques et enjeux*. [C6001] (2016).

KOTRONIS Panagiotis, GRANGE Stéphane. *Méthodes simplifiées pour le calcul non-linéaire de structures de génie civil*. [C6002] (2016).

CHATEAUNEUF Alaa. *La méthode des éléments finis – Calcul non-linéaire matériel*. [C6004]

(2018).

RICHARD Benjamin, GIRY Cédric. *Lois de comportement en calcul de structures - Identification et utilisation* [C6005] (2019).

Normes et standards

Eurocode (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures—Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium.

Réglementation

Sans objet

Brevets

Sans objet

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

Sans objet

Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

Sans objet

Documentation - Formation – Séminaires (liste non exhaustive)

Sans objet

Laboratoires – Bureaux d'études – Écoles – Centres de recherche (liste non exhaustive)

Université Gustave Eiffel, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Département Matériaux et Structures (MAST), Laboratoire Expérimentation et modélisation pour le génie civil et urbain (EMGCU)

Université Gustave Eiffel, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Département Matériaux et Structures (MAST), Laboratoire Comportement physico-chimique et durabilité des matériaux (CPDM)

Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC)

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Pôle Sûreté Nucléaire (PSN), Service d'Expertise des Equipements et des Structures (SES), Laboratoire de Modélisation et d'Analyse de la Performance des Structures (LMAPS)

Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), Pôle Sûreté Nucléaire (PSN), Service étude et recherche expérimentale (SEREX), Laboratoire de réalisation d'équipements expérimentaux (LR2E)

Chalmers tekniska högskola (Chalmers University of Technology)

Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT Cachan). Ecole Normale Supérieure Paris-Saclay, 61 avenue du Président Wilson, F-94230, Cachan, France.

Documentation – Formation – Séminaires (liste non exhaustive)

CAST3M, Code de calcul permettant la recherche de solutions approchées de systèmes d'équations différentielles à l'aide de la méthode des éléments finis. Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives. Centre de Saclay.
<http://www-cast3m.cea.fr>

CASTLAB, Boîte à outils éléments finis développée par Benjamin RICHARD et al. sous l'environnement MatLab®.
<http://www.castlab.fr>

Page personnelle d'Alexandre GANGNANT
<https://cv.archives-ouvertes.fr/alexandre-gangnant>.