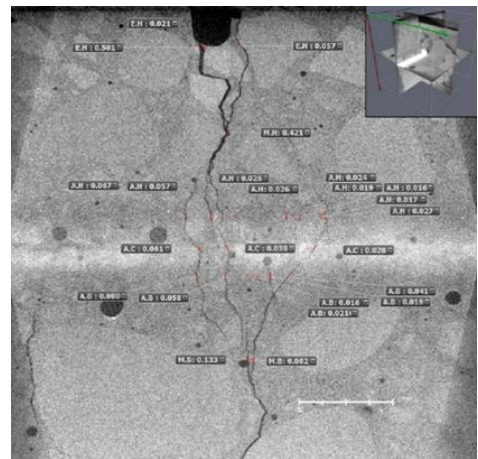
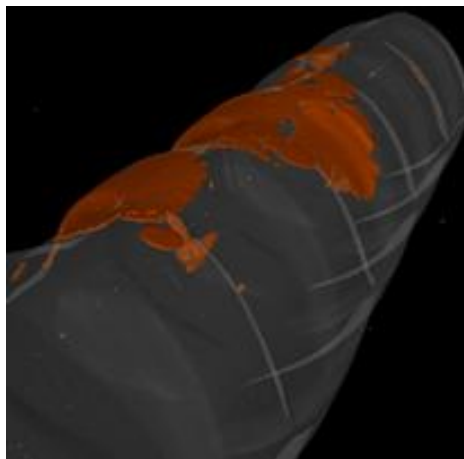


Projet CraCoDub

Crack, Corrosion and Durability

Etude de Faisabilité et de Montage

En vue de la labélisation **Projet National**



Etude rédigée par :

Laurent Boutillon et Mouna Boumaaza (VINCI Construction), Fabrice Deby et Thierry Vidal (LMDC), Abdelkrim Ammouche (SETEC-Lerm), Philippe Bisch et Olivier Lherminier (Egis), Lucas Adelaïde (UGE), Laure Abdul (Eiffage), Jean-Michel Torrenti (ESITC), Camilo Duran (IREX)

Avec la participation des membres des axes 1, 2, 3 et 4

TABLE DES MATIERES

Contexte et enjeux	5
Objectifs et périmètre du projet	6
<i>Objectifs scientifiques</i>	6
<i>Objectifs techniques, économiques et environnementaux</i>	6
<i>Objectifs normatifs et applicatifs</i>	6
<i>Périmètre du projet</i>	6
1 État de l'art	9
1.1 <i>Etat de l'art normatif</i>	9
1.1.1 Introduction	9
1.1.2 Eurocode 2	9
1.1.3 Normes internationales.....	12
1.2 <i>Etat de l'art scientifique et technique</i>	15
1.2.1 Corrosion vs ouverture de fissure en surface	15
1.2.1.1 Ouverture mesurable en surface Vs ouverture au niveau de l'acier	15
1.2.1.2 Initiation d'une activité de corrosion en présence de fissure	15
1.2.1.3 Propagation d'une activité de corrosion en présence de fissure	18
1.2.2 Mécanismes de corrosion en fond de fissure	19
1.2.3 Rôle des conditions environnementales	20
1.2.4 Conclusions partielles.....	21
1.2.5 Effets du colmatage naturel et de l'autocicatrisation	21
1.2.6 Modèles existants et leurs limites.....	23
1.2.6.1 Mécanisme de la corrosion induite dans le béton fissuré	23
1.2.6.2 Modèles analytiques.....	24
1.2.6.3 Modèles éléments finis « smeared crack » (endommagement / plasticité).....	26
1.2.6.4 Modèles à fissure explicite (éléments cohésifs, discrete crack, XFEM)	27
1.2.6.5 Modèles à champ de phase (phase-field).....	28
1.2.6.6 Conclusions	29
1.3 <i>Etat de l'art sur les essais expérimentaux</i>	31
1.3.1 Méthodes de génération et de contrôle des fissures en laboratoire.....	31
1.3.1.1 Méthode de génération de fissure	32
1.3.1.2 Techniques de contrôle de la fissuration	34
1.3.1.3 Protocole de fissuration et interface acier béton	35
1.3.2 Méthodes d'évaluation du faciès de fissuration	36
1.3.2.1 Méthode par imprégnation	37
1.3.2.2 La tomographie aux rayons X.....	38
1.3.2.3 Radiographie neutron	39
1.3.2.4 Autres techniques.....	40
1.3.3 Essais de corrosion et suivi électrochimique.....	40
1.3.3.1 Evaluation à partir du suivi de l'épaisseur des produits de corrosion.....	40
1.3.3.2 Mesure sur coupons métalliques d'une partie de l'activité cathodique	41
1.3.3.3 Evaluation à partir du suivi des pertes de masse	41
1.3.3.4 Evaluation des pertes de masse selon l'ouverture des fissures de corrosion	41
1.3.3.5 Evaluation par tomographie de rayons X	41

1.3.4	Besoins d'innovation méthodologique	42
1.4	État de l'art opérationnel.....	44
1.4.1	Introduction	44
1.4.2	Programme d'essai et retour d'expérience sur ouvrages existants	44
1.4.2.1	L'examen des parements et le relevé des désordres	44
1.4.2.2	Méthodes de diagnostic actuellement utilisées	45
1.4.3	Constatations sur les ouvrages existants : effet du retrait gêné.....	46
1.4.4	Retours d'expérience des gestionnaires d'ouvrages d'art (ponts, tunnels, ports)	48
1.4.5	Pratiques actuelles des entreprises de construction et de réparation	49
1.4.6	Cas emblématiques de pathologies de corrosion liées à la fissuration.....	49
1.4.7	Limites des approches opérationnelles actuelles	49
2	Originalité du Projet National	51
2.1	Positionnement du projet par rapport aux projets récents.....	51
2.1.1	PN CEOS.fr & ANR MEFISTO	51
2.1.2	PN PERFDUB & ANR MODEVIE	52
2.1.3	Projet DECOF-Ré.....	53
2.1.4	ANR APPLETT (Durée de vie des Ouvrages béton : Approche Prédictive Performantielle et probabilisTE)	53
2.1.5	Conclusions sur le positionnement du Projet CraCoDub	55
2.2	Verrous scientifiques et techniques identifiés et objectifs du Projet National	55
2.3	Retombées attendues du Projet National.....	57
2.3.1	Retombées liées à une meilleure compréhension des mécanismes de corrosion en fond de fissure... 57	57
2.3.2	Retombées liées à une évolution de l'annexe nationale Française vers les valeurs de l'EC2	57
2.3.2.1	Cas représentatif étudié.....	57
2.3.2.2	Retombées environnementales	58
2.3.2.3	Retombées économiques	58
2.3.3	Retombées potentielles liées à une modification des ouvertures autorisées par l'EC2 dans les cas XC2 à XC4	59
2.3.4	Autres retombées.....	59
3	Programme de recherche	61
3.1	Axe 1 - Expérimentations en laboratoire	61
3.1.1	Objectifs	62
3.1.2	Thème 1 : Étude des fissures et de leur géométrie au voisinage de l'armature	62
3.1.3	Thème 2 : Étude de la corrosion induite par les agents agressifs	62
3.1.3.1	Thème 2.1 : Étude de la corrosion induite par les chlorures	62
3.1.3.2	Thème 2.2 : Étude de la corrosion induite par carbonatation	63
3.1.4	Thème 3 : Modélisation des effets de phénomènes de corrosion	63
3.2	Axe 2 - Etude in situ sur structures réelles	65
3.2.1	Objectifs	65
3.2.2	Ouvrages cible et exemples	65
3.2.2.1	Caractéristiques de l'ouvrage cible idéal - critères de sélection	65
3.2.2.2	Exemples de cibles	66
3.2.3	Méthodologie.....	66
3.2.4	Organisation type d'une intervention	66
3.2.4.1	Etape 0 : Pré-sélection d'un ouvrage – étude des données existantes.....	66
3.2.4.2	Etape 1 : Première intervention – investigations préliminaires	67
3.2.4.3	Contractualisation.....	68

3.2.4.4	Etape 2 : Investigations approfondies au droit de la (ou des) fissure(s)	68
3.3	<i>Axe 3 - Evaluation d'actions préventives ou correctives</i>	71
3.3.1	Contexte et objectifs	71
3.3.2	Axe 3 - Thème 1 : Actions préventives mises en œuvre en amont du bétonnage	72
3.3.3	Axe 3 - Thème 2 : Actions préventives / correctives mises en œuvre en aval du bétonnage	73
3.3.4	Axe 3 - Thème 3 : Solutions exploratoires	75
3.3.5	Axe 3 - Thème 4 : Évaluation technico économique des solutions et recommandations	75
3.4	<i>Axe 4 : Dissémination et internationalisation</i>	76
3.4.1	Contexte et objectifs	76
3.4.2	Thème 1 : Comité Scientifique International (CSI)	76
3.4.3	Thème 2 : Développement de documents de référence	77
3.4.4	Thème 3 : Séminaires, Workshops et conférences	77
3.4.5	Thème 4 : Benchmark international	77
3.4.6	Thème 5 : Formation	78
3.4.7	Thème 6 : Normalisation	79
4	Organisation du projet	80
4.1	<i>Consortium et éléments de gouvernance</i>	80
4.1.1	Le Comité Directeur	80
4.1.2	Le Comité Scientifique et Technique	80
4.1.3	Bureau	80
4.1.4	Groupes de Travail	80
4.1.5	Partenariat potentiel	81
4.1.6	Site internet du PN et plateforme collaborative	81
4.2	<i>Comité Scientifique International</i>	82
4.3	<i>Planning prévisionnel du Projet National</i>	83
4.4	<i>Budget prévisionnel</i>	84
4.5	<i>Analyses de risques</i>	87
5	ANNEXES	89
5.1	<i>ANNEXE 1 – Fiches de familles de produits pouvant être tester dans le cadre de l’Axe 3</i>	89
5.1.1	Agents limitant le retrait – PCI	89
5.1.2	Agents Compensateurs de Retrait (ACR) au projet CraCoDub	90
5.1.3	Agents cristallisants & cicatrisants	92
5.1.4	Agents cristallisants cicatrisants – CWA	93
5.1.5	Agents cristallisants cicatrisants colloïdaux	93
5.1.6	Inhibiteurs de corrosion en masse	94
5.1.7	Hydrofuges de masse (composés organiques)	95
5.1.8	Hydrofuges de surface : Imprégnations hydrophobes non filmogène	96
5.1.9	Protection Cathodique par courants imposés	97
5.1.10	Injection de fissure	98
5.1.11	Fibres	98
5.1.12	Armatures présentant une résistance à la corrosion	99
5.2	<i>ANNEXE 2 – Résumé ANR Better-dub</i>	102
6	Références bibliographiques	103

Contexte et enjeux

La fissuration du béton est un phénomène normal et nécessaire au fonctionnement mécanique des structures en béton armé. Toutefois, elle constitue un vecteur privilégié de pénétration des agents agressifs (CO₂, ions chlorures, sulfates...), susceptible d'accélérer la corrosion des armatures et de compromettre la durabilité des ouvrages. Les normes actuelles, telles que l'Eurocode 2 (EN 1992-1-1) ou le *fib* Model Code 2020, imposent des limites prescriptives d'ouverture de fissure comprises entre 0,1 et 0,4 mm selon la classe d'exposition. Ces valeurs, appliquées uniformément, ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité des expositions, de la profondeur des fissures, ni des phénomènes de colmatage observés expérimentalement. De plus, elles divergent selon les annexes nationales (par exemple, 0,2 mm en France contre 0,3 mm dans la version européenne pour les classes XS/XD), ce qui révèle une absence de consensus scientifique et normatif.

Les conséquences de ce conservatisme sont multiples. Sur le plan de la conception, la limitation stricte de l'ouverture de fissure conduit souvent à un surdimensionnement des armatures, avec des taux d'acier supérieurs de 20 à 40 % dans certains cas par rapport aux prescriptions de l'ancien règlement BAEL. Ce sur-ferraillage augmente le coût des structures et alourdit leur empreinte carbone : la production d'acier représente entre 40 et 70 % des émissions de CO₂ d'un béton armé à 200kg/m³, selon les formules de béton et l'origine des armatures. Ainsi, des exigences normatives actuelles freinent la transition bas carbone recherchée par la profession.

Les enjeux scientifiques et techniques sont donc considérables : une meilleure compréhension du lien entre fissuration et corrosion est nécessaire, notamment à l'échelle de l'interface acier-béton en fond de fissure. Les travaux récents (Ghantous, 2016 ; Hess, 2024) montrent que, si l'ouverture de fissure influence la corrosion à court terme, son rôle s'atténue avec le temps, et d'autres facteurs — humidité, qualité de l'interface, colmatage, formulation du béton — s'avèrent déterminants sur l'évolution de la cinétique de corrosion à l'interface acier – béton. Cela remet en question la pertinence d'un critère unique basé sur la largeur de fissure. En parallèle, les méthodes de calcul actuelles négligent les phénomènes électrochimiques couplés à la mécanique de la fissuration, ce qui limite la fiabilité des prédictions à long terme et appelle au développement de méthodes plus représentatives des processus physiques en jeu.

Sur le plan normatif, l'absence d'harmonisation entre standards nationaux et européens crée une insécurité technique et juridique. Sur le plan économique, les coûts liés au surdimensionnement des armatures pèsent sur les maîtres d'ouvrage. Enfin, les enjeux environnementaux sont majeurs : réduire l'acier inutile permettrait d'abaisser significativement l'empreinte carbone du béton armé.

Dans ce contexte, le Projet National CraCoDub (Crack–Corrosion–Durability) constitue une opportunité unique. Son objectif est de fournir une base scientifique robuste pour revisiter les prescriptions normatives, notamment l'Eurocode 2 et le *fib* Model Code 2020. En s'appuyant sur des expérimentations en laboratoire et des observations in situ, le projet vise à identifier des indicateurs de durabilité plus réalistes que la simple largeur de fissure, à optimiser l'usage des armatures, et à proposer des stratégies techniques et réglementaires adaptées. Au-delà de l'avancée scientifique, CraCoDub s'inscrit ainsi dans une dynamique de transition écologique et économique, en réduisant le surdimensionnement des structures et en contribuant à l'évolution durable des normes de conception.

Objectifs et périmètre du projet

Objectifs scientifiques

Le projet CraCoDub vise à établir une compréhension approfondie des mécanismes de corrosion initiés en fond de fissure dans le béton armé, domaine encore insuffisamment décrit par l'état de l'art. Les travaux porteront sur l'analyse des processus physico-chimiques se développant à l'interface acier-béton en présence de fissures, en identifiant les paramètres influençant la cinétique de corrosion (géométrie des fissures, environnement d'exposition, nature des bétons, etc.). Une attention particulière sera accordée au rôle du colmatage naturel et des phénomènes d'auto-cicatrisation dans l'évolution temporelle de la corrosion. Le projet évaluera également l'efficacité technico-économique de solutions préventives et correctives visant à limiter la corrosion en zones fissurées. Ces avancées fourniront une base scientifique solide pour une révision future des critères de fissuration admis dans les codes de conception.

Objectifs techniques, économiques et environnementaux

Le projet vise à optimiser l'usage des armatures ajoutées pour satisfaire les exigences de durabilité, en réduisant les surdimensionnements sans compromettre la performance structurelle. Il s'agira également d'identifier et d'évaluer des solutions préventives ou correctives qui soient à la fois techniquement efficaces, économiquement soutenables et faiblement carbonées, afin de limiter l'impact environnemental global des ouvrages en béton armé.

Objectifs normatifs et applicatifs

Le projet a pour ambition de produire des recommandations constructives et réglementaires fondées scientifiquement, et de contribuer à l'évolution des principaux codes et normes de durabilité (Eurocode 2, *fib* Model Code, RCC-W). Il vise également à développer des méthodes de modélisation et des protocoles d'essais susceptibles d'être normalisés et directement utilisables par les ingénieurs pour la conception et la vérification des ouvrages.

Périmètre du projet

Le sujet étant particulièrement vaste, il est indispensable de définir précisément le périmètre du projet national. À cette fin, nous proposons de restreindre le cadre du projet au périmètre suivant :

- **Structures concernées : béton armé** uniquement.

La problématique de l'influence de l'ouverture des fissures sur la durabilité de structures précontraintes constitue également un sujet d'intérêt. Toutefois, au stade actuel du projet, il apparaît nécessaire de limiter le périmètre aux structures en béton armé.

L'effet de l'ouverture des fissures sur la durabilité des ouvrages en béton précontraint pourra être traité ultérieurement, lorsque ce projet aura déjà fourni suffisamment de résultats permettant de mieux définir les objectifs d'une étude dédiée.

Dans le cadre de l'axe 3, il pourra néanmoins être intéressant d'utiliser les modes opératoires d'essai définis dans les axes 1 et 2 pour évaluer l'effet de l'ajout de fibres dans une structure en béton armé sur les faciès de fissuration en profondeur.

- **Type d'ouvrages** : ouvrages d'art, infrastructures de surface, souterrains et fondations spéciales, avec résistance à la compression à 28 jours sur cylindre ≥ 30 MPa et ratios de ferrailage significatifs. (Ratio typiquement $> 150-200$ kg/m³ ou plus).

Il a été constaté que l'accroissement des quantités d'armatures mises en œuvre pour maîtriser les ouvertures de fissure est d'autant plus important que les structures sont épaisses, exposées à des milieux agressifs, réalisées avec des bétons de résistance à la compression élevée, des enrobages élevés et des ratios d'armatures significatifs. Dans ce contexte, le projet ciblera plus spécifiquement ces ouvrages pour lesquels, les retombées scientifiques et techniques du PN seront maximales.

La généralisation des résultats du PN aux autres structures ou éléments de structure en béton armé, par exemple éléments préfabriqués ou bâtiments courants, se fera soit naturellement s'agissant de béton armé, soit moyennant des études complémentaires spécifiques.

- **Bétons étudiés** : bétons utilisés actuellement à faible teneur en clinker, formulés à partir de constituants normalisés, durables, justifiés soit par approche prescriptive (Fascicule 65 & NF EN 206/CN +A2) soit par approche performantielle (FD P18-480), les bétons issus d'anciens Projets Nationaux : PerfDub, BHP 2000 Le béton à base de ciment Portland CEM I sera étudié comme référence.

Pour le choix des bétons qui seront étudiés, nous nous focaliserons sur les types de formulation qui sont et seront de plus en plus utilisées pour la réalisation des ouvrages cibles.

Il s'agit donc de formulations à faible teneur en clinker afin de limiter l'impact carbone des constructions neuves.

Nous étudierons des formules déjà couramment utilisées pour la construction neuve d'infrastructures de Génie civil et d'autres, plus récentes et/ou prospectives, formulées pour réduire drastiquement leur impact carbone.

Bien évidemment, une partie limitée (à préciser) des essais sera réalisée à partir de formules 100 % CEM I afin de pouvoir rattacher nos études à la littérature et appliquer les résultats obtenus aux structures existantes réalisées avec ces bétons.

- **Échelle spatiale** : zone au voisinage de la fissure, dont l'origine n'est pas la corrosion initiale de l'armature.

Il est essentiel de distinguer clairement deux situations afin d'éviter tout hors sujet par rapport à l'objet du projet national. En effet, lorsqu'il est question de durabilité des structures en béton armé, la corrosion et la fissuration sont fréquemment abordées de manière conjointe, au risque d'entretenir une confusion entre des mécanismes de nature et de chronologie différentes :

- Dans la première situation, il s'agit des structures existantes, âgées, présentant des pathologies nécessitant à court ou moyen terme, une réparation généralement lourde pour accroître leur durée de vie résiduelle.

Dans cette situation, le front d'agents agressifs pénètre l'enrobage jusqu'à atteindre les armatures à de nombreux endroits ce qui initie une corrosion des aciers. Les produits de corrosion qui sont expansifs génèrent une pression qui initie d'abord une fissuration de l'enrobage au voisinage des armatures puis des éclatements.

Ainsi, dans cette situation, qui est la plus courante et à laquelle on pense en premier lieu, la fissuration délétère est induite par la pression due à l'expansion des produits de corrosion.

En d'autres termes, dans cette situation **la corrosion précède la fissure.**

- Dans la seconde situation, il apparaît une fissure d'origine Thermo-Hydro-Mécanique au sens large, c'est-à-dire apparaissant sous l'effet des sollicitations externes (chargement, température, tassement différentiel, redistribution par fluage, ...) ou internes (retrait hydrique, retrait thermique jeune âge lié à la chaleur d'hydratation, ...) **non liées à la corrosion.**

À l'exception de la fissure de retrait gêné et des redistributions par fluage, ces fissures « THM » apparaissent plutôt en début de vie de l'ouvrage.

Une fois apparue, la fissure constitue un chemin préférentiel permettant aux agents agressifs d'atteindre rapidement l'armature.

À l'intersection entre l'armature et la fissure (ou les branches de la fissure), une anode s'initie assez rapidement, conduisant à une amorce de corrosion.

En d'autres termes, dans cette seconde situation : **la fissure précède la corrosion.**

L'objet du PN est très spécifiquement d'étudier la cinétique de corrosion en fond de fissure correspondant à la seconde situation, c'est-à-dire dans laquelle <u>la fissure précède la corrosion.</u>
--

- **Environnements étudiés** : environnements agressifs à très agressifs vis-à-vis de la corrosion (Environnement marin, sels de déverglaçage, urbain pollué, carbonatation).

Ces environnements correspondent aux classes d'exposition XS, XC et XD

Le cas du couplage carbonatation/chlorures est en réflexion et pourrait être traité expérimentalement dans l'axe 1, en considérant les mêmes cycles d'humidification/séchage pour les essais de carbonatation et de chlorures, afin de pouvoir comparer les mécanismes et vitesses de propagation. Cette méthode permettrait d'obtenir des données comparables sur la propagation et sur les différences de mécanismes entre carbonatation seule et carbonatation avec chlorures, en gardant la carbonatation présente dans tous les essais.

- **Temporalité** : étude du court terme (~1/3 ans) en laboratoire et moyen terme (~10/20 ans) sur ouvrages au regard de la durabilité attendue.
- **Sollicitations** : situations caractéristiques, quasi-permanentes ou fréquentes (pas d'accidentelles comme séisme, choc, incendie). Sollicitations statiques et sollicitations cycliques.
- Dans le cadre du projet, nous nous focaliserons sur les situations pour lesquelles l'ouverture de fissure a un effet direct sur la durabilité, et donc sur des ouvertures de fissure correspondant à des situations de « longue durée », c'est-à-dire quasi permanentes au sens des Eurocodes.

Les actions extrêmes ou accidentelles ne rentrent donc pas dans le champ de cette étude.

1 État de l'art

1.1 Etat de l'art normatif

1.1.1 Introduction

Lorsque les actions appliquées sont faibles, qu'elles soient dues aux forces ou aux déformations imposées, le béton et l'acier sont intimement liés, au sens où ils subissent les mêmes déformations. Très rapidement dans la vie de l'élément, notamment à cause du retrait ou des importantes variations de température au jeune âge, la résistance à la traction du béton est atteinte et il apparaît donc une fissure (elle peut rester interne au jeune âge). La fissuration provoque immédiatement une modification de l'état des contraintes et des déformations dans le béton en raison de la discontinuité mécanique, ceci à l'échelle de quelques centimètres, alors que bien sûr les armatures traversant la fissure restent continues. Dès lors, il n'y a plus égalité des déformations entre béton et armatures, mais l'adhérence entre les deux milieux fait qu'il y a résistance au glissement.

Le cas le plus démonstratif (suffisant pour comprendre les phénomènes) est celui du tirant soumis à une traction axiale. Si sa section a une dimension limitée, on peut raisonnablement supposer qu'une fissure intéresse la totalité du plan de la section. Une telle fissure sépare le béton du tirant en deux parties, de part et d'autre de la fissure, reliées par les armatures qui traversent la fissure. Il y a rétractation du béton de part et d'autre de la fissure du fait que les contraintes de traction dans le béton sont nulles au droit de la fissure et augmentent progressivement en s'en éloignant, grâce à l'adhérence. Les armatures entraînent le béton via la contrainte d'adhérence entre les deux matériaux, associée à un glissement. Progressivement, la traction dans le béton augmente alors que celle des armatures diminue, jusqu'à ce que la traction dans le béton atteigne à nouveau la résistance à la traction, auquel cas une nouvelle fissure se produit.

Si la traction d'origine structurale augmente dans le tirant, les fissures apparaissent progressivement dans le tirant, car la résistance à la traction est statistiquement dispersée. L'ordre de grandeur de l'intervalle entre la valeur minimale et la valeur maximale est de l'ordre de 60 % de la moyenne, mais cela dépend évidemment de la constitution du béton. Il faut entendre « minimale » et « maximale » comme des valeurs caractéristiques, car cette distribution de résistance ne peut être représentée que par une variable aléatoire. Il en résulte que l'apparition des fissures est progressive lorsque la traction augmente, c'est la phase d'établissement de la fissuration, qui commence là où le béton est le moins résistant. Entre deux fissures, les armatures et le béton glissent les unes par rapport à l'autre. Lorsqu'un nombre suffisant de fissures s'est créé pour qu'elles soient suffisamment rapprochées, l'adhérence n'est plus capable de transférer plus de traction dans le béton entre les fissures et il ne se crée plus de nouvelle fissure. C'est la phase de stabilisation. Il y a alors glissement complet entre béton et acier et l'état de contrainte n'évolue plus dans le béton. Ceci fixe la participation du béton à l'équilibrage de la traction et à la rigidité du tirant (« tension stiffening » en Anglais). Néanmoins, ce terme évolue en fonction des déformations atteintes, notamment par la loi d'adhérence ; il est plus faible à l'ELU qu'à l'ELS, où les valeurs sont usuellement exprimées, car l'interface est affaiblie.

Cette brève description permet de comprendre la façon dont l'ouverture de fissure est calculée.

1.1.2 Eurocode 2

Dans les normes comme l'Eurocode 2 (EC2), dès lors que l'on a un enrobage et une qualité de béton adéquat, la limitation d'ouverture de fissure devient le principal paramètre de contrôle de la corrosion des armatures.

La nature de l'agressivité de l'environnement est bien prise en compte par la limitation de l'ouverture acceptable.

L'ouverture de fissure relève de considérations de mécanique en prenant en considérations deux échelles : la première est locale (de l'ordre de l'épaisseur de l'élément) et est due au transfert des contraintes entre

les armatures et le béton ; la seconde est due au comportement d'ensemble de la structure sous l'effet des actions qui lui sont imposées.

L'Eurocode 2 de seconde génération impose des propriétés mécaniques pour le béton, en relation avec la corrosion. De façon plus générale, il est renvoyé à l'EN 206 pour le béton et à l'EN 13670 pour les armatures, pour les qualités des matériaux. Pour ce qui concerne l'impact de la corrosion, une note précise que : *“For the purpose of assessing durability, end of design service life is considered to have been reached when there is corrosion attack in the reinforcement and/or loss of concrete thickness or strength of the structural element, to an extent that impairs its performance.”* Ceci confirme que la corrosion peut être admise si elle reste dans certaines limites en fin de vie de projet, mais il n'y a pas d'indication concernant son initialisation et sa cinétique.

La prescription principale est formulée de la façon suivante : *« Corrosion protection of steel reinforcement should be provided by controlling quality of concrete, thickness and extent of cracking of the concrete in the cover zone »*. Cette formulation limite le contrôle de la corrosion à trois paramètres, essentiellement liés à l'enrobage, qui joue un rôle central dans la démarche de vérification. Parmi ces paramètres, l'ouverture de fissure en surface constitue un critère crucial. Il convient de noter néanmoins que la limitation de l'ouverture de fissure n'est pas motivée seulement par la prévention de la fissuration mais participe plus largement à la durabilité et aux performances globales de la structure.

La classe d'exposition et la classe de résistance du béton déterminent un enrobage minimal qui ralentit la pénétration des agents agressifs. La classe d'exposition impose une classe de résistance minimale et une ouverture de fissure maximale à l'ELS (quasi permanent, fréquent ou caractéristique), ainsi qu'un ferrailage minimal. L'ouverture de fissure est calculée à la surface du béton.

Ainsi, il s'agit d'une vérification globale indépendante de l'initiation de la corrosion et de son évolution. Par ailleurs, la vérification d'ouverture de fissure est faite pour une fissure unique, en surface du béton, alors que la fissure a plusieurs embranchements à proximité d'une armature, avec des ouvertures plus faibles. Pour un béton d'enrobage donné, l'influence de la présence de la fissure sur la progression des ions et la cinétique de corrosion n'apparaît donc que par le biais de son ouverture à la surface, sans considération de sa topographie interne.

S'agissant d'une norme pour vérifier la conception d'une structure, il est logique de donner des règles de vérification qui n'impliquent pas une connaissance fine du phénomène. Le Code Modèle 2020 (MC 2020) de la *fib* offre en revanche des modèles de propagation de la corrosion en fonction du temps pour la carbonatation et les attaques de chlorures. Mais la démarche de vérification à l'ELS par l'ouverture de fissure est similaire à celle de l'EC2.

La forme des formules ne diffère pas sur le fond entre les normes puisqu'elle traduit un comportement aisément explicable. En prenant par exemple la formulation du calcul de l'Eurocode 2 (1^{ère} génération), l'ouverture d'une fissure s'écrit :

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

Le terme entre parenthèses se comprend bien, puisqu'il exprime que l'ouverture de fissure est due à la différence de déformation entre béton et acier, ce qui n'est qu'un cumul de longueurs. Il s'exprime par :

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

Le terme σ_s est la contrainte de traction dans les armatures au droit de la fissure, donc sans contribution du béton. L'étude du tirant soumis à une traction axiale s'avère être l'analyse la plus instructive et la plus pertinente pour appréhender les phénomènes physiques en jeu. Dans ce type de cas, la contrainte de traction est due à l'effort normal qui se développe du fait du comportement d'ensemble de la structure sous l'effet des actions ; cet effort normal est nul si le tirant est libre de se déformer axialement.

Le terme qui vient en déduction traduit la contribution du béton à la traction entre deux fissures, qui diminue l'allongement que les armatures subiraient si elles étaient seules (« tension stiffening »). Ce terme est donc entièrement dû aux échanges locaux de contraintes entre béton et armatures, indépendamment du comportement global de la structure ; il existe dès lors qu'il y a fissuration, même s'il n'y a pas de chargement extérieur.

Le premier terme $s_{r,max}$ est la distance « maximale » entre deux fissures, longueur nécessaire pour le bilan de longueur. Il est donné par l'expression :

$$s_{r,max} = k_3 c + k_1 k_2 k_4 \phi / \rho_{p,eff}$$

où le premier terme est proportionnel à l'enrobage c . Cette formulation suppose donc que l'ouverture de la fissure à la surface augmente linéairement avec l'enrobage. Le second terme traduit la longueur du morceau de béton le long de laquelle sa résistance à la traction n'est pas dépassée, sensée être calculée au droit de l'armature.

L'espacement réel entre fissures souffre d'une variabilité assez importante, compte tenu de la variabilité de la résistance du béton. En phase de fissuration stabilisée, cette distance peut varier d'un facteur de 1 à 2. L'espacement considéré ici est l'espacement maximal, ce qui est cohérent avec le fait que la valeur de l'ouverture de fissure est la valeur caractéristique. Ce qui peut apparaître comme une nuance est en fait important ; par exemple le coefficient k_3 est pris égal à 3,4, alors que dans le *fib Model Code 2020 (MC 20)*, le terme correspondant est proposé à 2, ce qui donne une valeur très différente de l'espacement maximal.

En phase d'établissement de la fissuration, la distance entre fissures peut être plus élevée, si bien que localement l'ouverture de fissure peut être plus grande pendant cette phase que pendant la phase stabilisée. En particulier, le retrait, hydrique et/ou thermique, peut suffire à générer des fissures sans effet significatif d'autres actions.

On note que la quantité donnée par l'EC2 est une valeur caractéristique, ce qui insiste bien sur la dispersion de la quantité. Le *fib MC 20* donne une valeur de calcul, qui n'est pas autrement qualifiée, mais qui est également donnée à la surface. Tout cela confirme le caractère très aléatoire de la valeur de l'ouverture de fissure, constaté lors de multiples expérimentations. Le fait de prendre une valeur caractéristique (maximale) de l'ouverture de fissure peut apparaître comme excessivement prudent, car cela concentre l'attention sur une seule fissure parmi un ensemble de fissures en nombre suffisamment grand pour faire une statistique.

Bien que les codes donnent des corrections possibles, cela ne donne pas d'indication directe sur l'ouverture au droit de l'armature, d'autant que la fissure s'est généralement ramifiée en multiple branches dans l'épaisseur d'enrobage jusqu'à l'armature du fait de l'interaction avec le cisaillement au voisinage de l'armature.

L'Eurocode 2 de seconde génération se montre plus prudent sur l'évaluation de l'ouverture de fissure, qui se présente sous la forme suivante :

$$w_{k,cal} = k_w \cdot k_{1/r} \cdot s_{r,m,cal} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$$

où l'espacement $s_{r,m,cal}$ et l'ouverture $w_{k,cal}$ sont des valeurs de calcul (nominales) et – en principe - plus caractéristiques. Cependant, la valeur de calcul de l'ouverture est obtenue à partir de la valeur moyenne via le coefficient k_w , dont la valeur recommandée est 1,7, donc proche de la valeur caractéristique.

Le *fib MC 20* propose plusieurs approches pour la spécification de durabilité, qui concernent d'abord la composition du béton. Dans son chapitre 30.6, le code propose plusieurs méthodes pour la vérification de la durabilité, d'origine essentiellement probabiliste, incluant l'initiation de la corrosion et son développement au cours du temps sous diverses agressions. Ces approches sont beaucoup plus détaillées que dans la version précédente. Pour ce qui concerne l'ouverture de fissure, quelques modifications sont apportées par rapport à la version précédente, sans en changer le principe.

1.1.3 Normes internationales

Le Tableau 1 ci-après présente une analyse comparative des prescriptions nationales et internationales et révèle une grande hétérogénéité. Par exemple, pour la classe d'exposition XS2 (immersion en eau de mer), la limite admise est de 0,2 mm en France, en Suède et au Danemark, de 0,3 mm au Royaume-Uni, aux États-Unis et en Nouvelle-Zélande. De même, pour la classe XC1 (carbonatation en milieu sec), les valeurs oscillent entre 0,3 mm (UK), 0,4 mm (France), et 0,45 mm (Suède). Ces divergences ne concernent pas uniquement l'Europe, mais se retrouvent également entre continents, comme l'illustrent les différences présentes dans le Tableau 1.

Cette absence de consensus international reflète le caractère largement empirique des critères actuels, souvent hérités de pratiques nationales plutôt que fondés sur une compréhension scientifique robuste des mécanismes corrosion–fissuration. De plus, les prescriptions tabulaires ne prennent pas en compte la variabilité réelle des paramètres influents, tels que la morphologie des fissures, la cinétique d'entrée des agents agressifs (chlorures, CO₂), les cycles humidité/séchage ou encore la formulation du béton et l'enrobage des armatures.

Les spécifications japonaises soulignent que la corrosion des armatures ne dépend pas uniquement de la largeur des fissures. Les valeurs limites prescrites doivent donc être comprises comme des exigences minimales, sans garantir l'absence de corrosion en dessous de ces seuils. Une spécificité notable de la norme japonaise est que la largeur de fissure admissible est directement reliée à l'épaisseur de l'enrobage en béton : un enrobage plus important permet d'accepter des fissures plus larges. Ainsi, les valeurs proposées dans le Tableau 1 ont été établies en fonction des conditions environnementales pour du béton armé, mais restent indicatives. L'admissibilité finale des fissures doit être déterminée au cas par cas, en tenant compte de l'environnement réel de la structure et de la méthode d'estimation employée.

Tableau 1 : Comparaison internationale des ouvertures de fissure admissibles selon les classes d'exposition

Classe d'exposition	Condition d'exposition	EN 1992-1-1 (2023)	UK (mm)	Norvège (mm)	Canada (mm)	France (mm)	Denmark (mm)	Suede (mm)	USA (mm)	Nouvelle Zélande	Japon (mm)	fib MC2020
X0	Sans risque de corrosion	-	0,3	0,4	0,35	0,4	-	-	0,41	-		0,4
XC1	Corrosion par carbonatation – sec ou humide en permanence	-	0,3 ^a	0,3 k _c	0,35	0,4	-	0,45	0,41	-	0.005c	0.3
XC2	Corrosion par carbonatation – humide en permanence	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,35	0,3	0,4	0,40	0,3	0,3 (classes A2 & B2)	0.004c	0.3
XC3	Corrosion par carbonatation – modéré	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,35	0,3	0,4	0,30	0,3	0,3 (classes A2)	0.004c	0.3
XC4	Corrosion par carbonatation – cycles humide/sec	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,35	0,3	0,4	0,30	0,3	0,3 (classes B1)	0.0035c	0.3
XS1	Chlorures – air marin	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,25	0,2	0,2	0,20	0,3	0,3 (classes B1)	0.004c	0.3
XS2	Chlorures – immersion	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,25	0,2	0,2	0,20	0,3	0,3 (classes B2)	0.004c	0.3
XS3	Chlorures – zone de marnage	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,25	0,2	0,2	0,15	0,15	0,2 (classe C)	0.0035c	0.3
XD1	Chlorures – sels de déneigement, modéré	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,25	0,2	0,2	0,20	0,18	-	0.004c	0.3
XD2	Chlorures – sels, cycles humide/sec	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,25	0,2	0,2	0,20	0,18	-	0.004c	0.3
XD3	Chlorures – forte concentration	0,3 k _{surf}	0,3	0,3 k _c	0,25	0,2	0,2	0,15	0,18	-	0.0035c	0.3
Structures retenant de l'eau		0,2	0,1				0,1	-	0,1	0,1	-	0,2

$$K_{surf} = C_{act} / (10 \text{ mm} + C_{min,dur}) \leq 1,5 \quad K_c = C_{nom} / C_{min,dur} \leq 1,3$$

En conclusion, pour la maîtrise de la corrosion, les normes donnent une importance particulière à l'enrobage par son épaisseur, la qualité du béton et l'ouverture des fissures. Concernant l'ouverture de fissure, il est noté que les calculs donnent l'ouverture à la surface, alors que la topographie réelle des fissures dans le béton d'enrobage jusqu'à l'armature n'est pas représentée et qu'elle joue probablement un rôle important dans le développement de la corrosion. Les ouvertures constatées expérimentalement sont très dispersées, ce qui conduit à des évaluations prudentes. L'initiation de la fissuration et la dépendance au temps n'interviennent pas dans la norme, mais elles sont abordées dans le Modèle Code. Le calcul d'ouverture au résultat déterminé (une valeur pour une variable aléatoire) est confronté à une limite elle aussi déterminée dépendant des agressions de diverses natures que peut subir l'élément. Une approche de nature probabiliste paraît plus adaptée à un phénomène de nature aussi aléatoire.

Si l'influence de la qualité du béton est incontestable (encore faut-il vérifier que tous les paramètres utilisés sont pertinents et complets), c'est la vérification de l'ouverture de fissure qui pose problème. En effet, une ouverture importante de fissure joue un rôle incontestable dans le développement de la corrosion ; mais la façon dont elle est contrôlée par les codes porte l'attention sur une ou quelques fissures parmi un ensemble, pour lesquelles une valeur (caractéristique ou de calcul) est attribuée. Dès lors que l'ensemble des ouvertures de fissures présente une valeur moyenne plus petite, faut-il corrélérer le phénomène de corrosion à une valeur locale ou à une plus globale ? Quel rôle joue la façon dont la corrosion s'est initiée sur son développement ? Sur ces sujets, le MC 20 propose des méthodes qui méritent d'être considérées.

Le projet CraCoDub représente une opportunité unique de faire évoluer la normalisation en matière de conception des structures en béton armé. Les résultats attendus permettront de réviser les prescriptions actuelles, qui paraissent trop conservatrices, et d'introduire des critères de durabilité basés sur des mécanismes scientifiquement établis. Cette évolution est stratégique pour réduire l'empreinte carbone du secteur tout en garantissant la sécurité et la pérennité des ouvrages.

À court terme, l'annexe nationale française de l'Eurocode 2 pourrait être adaptée afin de corriger les excès de conservatisme introduits par les nouvelles formules de calcul de l'ouverture des fissures. L'objectif serait de revenir à des quantités d'armatures proches de celles pratiquées auparavant, tout en tenant compte des spécificités des ouvrages français et des résultats d'essais locaux. Cette adaptation viserait à garantir la viabilité économique des projets, notamment en évitant des surcoûts injustifiés, et à intégrer les évolutions techniques concernant l'épaisseur, l'enrobage et la courbure des éléments, tout en assurant la durabilité des structures.

1.2 Etat de l'art scientifique et technique

1.2.1 Corrosion vs ouverture de fissure en surface

Beeby conclut, dès 1978, que s'il doit y avoir un lien entre l'ouverture de fissure initialement présente dans le béton et l'activité de corrosion, cela ne peut être qu'avec l'ouverture de fissure existant à l'interface acier – béton (Beeby, 1978). On commence donc par s'intéresser au lien entre l'ouverture de fissure visible en surface et celle obtenue au niveau de l'interface acier-béton, plus difficilement mesurable, afin de mieux comprendre comment cette relation influence le risque de corrosion des armatures.

L'étude du lien entre propagation de corrosion et fissuration pré corrosion dans le béton devrait être indissociable d'une caractérisation fine de la typologie de la fissure au cœur du matériau.

1.2.1.1 Ouverture mesurable en surface Vs ouverture au niveau de l'acier

La caractérisation du lien entre l'ouverture de fissure mesurable à la surface du béton et celle au niveau de l'acier a fait l'objet de nombreuses études. Husain et Ferguson (Husain et al., 1968) ne constatent pas de lien direct entre l'épaisseur d'enrobage et l'ouverture de fissure au niveau de l'acier, malgré une tendance à une décroissance de l'ouverture de fissure de la surface du béton au niveau de l'armature. Beeby montre également une différence significative entre l'ouverture de fissure mesurée en surface et celle au niveau des aciers. Broms, puis Tammo et Thelandersson respectivement dans (Broms, 1965) et (Tammo et Thelandersson, 2006) constatent également que, si l'ouverture de fissure mesurable en surface est en lien avec la contrainte dans l'acier, la redistribution des contraintes de traction à l'interface acier - béton ne permet pas d'établir de corrélation entre l'ouverture en surface et celle au niveau de l'acier. Sur un élément en traction, Goto et Otsuka (1971) puis Borosnyói et Snóbli (2010) constatent également une réduction de l'ouverture de fissure, selon sa proximité à l'armature. La formation d'une fissure s'accompagne d'un endommagement mécanique de l'interface acier-béton, lié à la formation de fissures internes dites secondaires. Ces fissures secondaires, observées par Goto et Otsuka (1971) sur un tirant en traction, ont été attribuées à la redistribution de l'effort de traction de l'acier vers le béton qui conduit localement à la formation de fissures au droit des crénelures. Cette décohésion de l'interface acier-béton au voisinage de la fissure a également été montrée qualitativement par François et Maso (1988) à travers l'évaluation des fronts de carbonatation ou de pénétration de chlorures. Pease et al. (2006) constatent sur des éléments en flexion que la tortuosité de la fissure principale semble augmenter avec la diminution du diamètre maximal des granulats et que l'application d'un chargement cyclique conduit à une uniformisation de l'endommagement mécanique du béton au voisinage de l'acier. Naotunna et al. (2021) constatent, pour les corps d'épreuve présentant une armature haute adhérence, que le rapport entre l'ouverture moyenne en surface et celle au niveau de l'acier varie de 5 à 10. Pour des spécimens présentant un enrobage de 2 cm, fissurés en flexion 3 points, Hess (2024) observe à partir de la tomographie par rayons X, une ramification importante de la fissure au voisinage de l'acier.

1.2.1.2 Initiation d'une activité de corrosion en présence de fissure

La littérature considère principalement la fissure comme étant caractérisée par son ouverture en surface et s'accorde sur l'impact de la fissuration sur l'initiation, au droit de celle-ci, d'une activité de corrosion (Boschmann Käthler et al., 2017), (Kanavaris et al., 2023), (Pacheco et Polder, 2012). Cet impact est double car il concerne à la fois la localisation des sites anodiques et la durée nécessaire à l'initiation d'un site de corrosion actif.

Par la fracture qu'elle constitue, la fissure favorise l'accès aux agents agressifs à l'armature, conduisant à une initiation prématurée d'une activité de corrosion (Boschmann Käthler et al., 2017 ; Mohammed et al., 2001 ; François et al., 2012 ; François et Arliguie, 1999 ; Jacobsen et al., 1998 ; Otieno et al., 2010 ; Mohammed et al., 2003 ; Sakai et Sasaki, 1994 ; Coppola, 1996 ; Li, 2000 ; Bertolini, 2004 ; Torres et Andrade, 2013 ; Wang et al., 2015 ; Hornbostel et Geiker, 2017 ; Shaikh, 2018 ; Misra et Uomoto, 1991

; O'Neil, 1980 ; Suzuki et al., 1990 ; Ji et al., 2016 ; Subramaniam et Bi, 2010). Il faut toutefois noter que si l'initiation, en fond de fissure, d'une activité de corrosion est systématique lorsque l'on s'intéresse à des spécimens ne présentant qu'une seule fissure, pour les échantillons multi-fissurés, la formation de sites actifs, au droit des fissures majeures, est de nature à induire, par couplage galvanique, une polarisation cathodique de l'acier à son voisinage, différenciant ou empêchant la formation de sites actifs au droit des fissures mineures (O'Neil, 1980 ; Suzuki et al., 1990 ; Zhang et al., 2020). Suzuki et al constatent une initiation, préférentiellement au droit des fissures présentant les ouvertures les plus importantes (majeures), retardant l'initiation au droit de fissures plus fines (mineures) (Suzuki et al., 1990) O'Neil (1980) constate également, sur une série de poutres multi-fissurées et exposées à des cycles de marnage en front de mer, la formation de sites actifs au droit des fissures majeures, tandis que les fissures mineures ne présentent pas de signe de corrosion. Plus récemment, Zhang et al ne constatent aucune perte de section au droit de certaines fissures mineures résultant de fissures majeures (ouvertures de fissure maximales en surface d'environ 200 μm) sur des poutres multi-fissurées, exposées à un brouillard salin sur une durée de 38 mois (Zhang et al., 2020).

S'il apparaît clairement que la présence d'une fissure contribue à la création d'un site anodique, peu d'études permettent de quantifier cette influence en fonction de la densité de fissuration et de la morphologie du faciès de fissuration, soit par manque de spécimens de référence (non fissurés), soit car la fréquence des mesures réalisées ne permet pas de détecter l'initiation (Boschmann Käthler et al., 2017). De plus, la communauté scientifique s'accorde sur le fait qu'il n'existe, à l'heure actuelle, aucune corrélation directe entre l'ouverture de fissure en surface et son influence sur la réduction de la durée nécessaire à l'initiation (Kanavaris et al., 2023) alors que de nombreuses études ont quantifié l'effet marqué de l'ouverture de fissure sur la pénétration des agents agressifs via l'augmentation des coefficients de transfert, coefficient de diffusion aux chlorures et perméabilité au gaz (Djerbi 2008 & 2013). Sur le tronçon situé au droit de l'armature, Mohammed et Otsuki constatent une initiation instantanée ($\text{}$), quelle que soit l'ouverture de fissure en surface (100 ; 300 et 700 μm). Otieno et al, constate également une initiation instantanée (quelques semaines) de l'activité de corrosion, pour des ouvertures de fissure de 400 et 700 μm (Otieno et al., 2010), (Otieno, 2016). Scott et Alexander (Scott et Alexander, 2007) confirment cette tendance, pour des spécimens, présentant une seule fissure de 200 et 700 μm . Sur des prismes présentant une ouverture en surface de 800, 700 et 300 μm , Hess quantifie la formation des sites actifs par micro-tomographie aux rayons X à échéances régulières (7 puis 14 jours). Tel qu'illustré en Figure 1 , il observe que l'ouverture en surface qui varie de 100 à 800 μm selon les éprouvettes conduit à des ouvertures significativement plus étroites au niveau des aciers (dizaine de μm). En dépit de cela, l'amorçage de la corrosion par pénétration d'ions chlorure est systématique en fond d'une fissure (Naotunna et al., 2021). Ces résultats sont surprenants au regard des résultats obtenus par Djerbi qui démontrent qu'en deca d'une ouverture de 80 μm le coefficient de diffusion reste identique à celui obtenu dans un matériau sain (Djerbi, 2008).

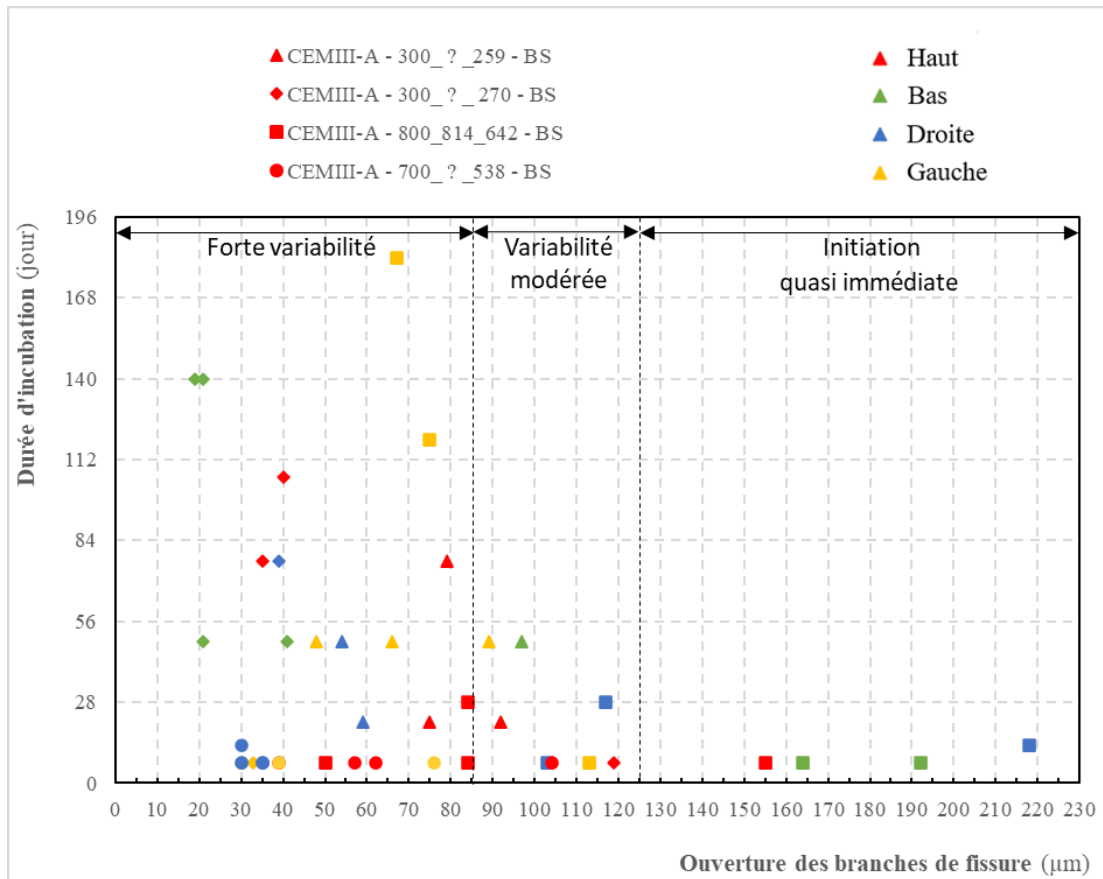


Figure 1: Durée d'incubation avant la formation d'un site actif, en fonction de l'ouverture des branches des fissures et de leur orientation (Hess,2024)

Enfin, à partir de l'étude bibliographique, le Tableau 2 proposé par Hess et al présente une synthèse sur la possibilité d'initier une activité de corrosion selon le type et l'ouverture de fissure étudié ainsi que l'enrobage.

Tableau 2 : Possibilité d'initier une activité de corrosion selon l'ouverture de fissure et l'enrobage ✓ oui (corrosion) X non

Fissuration	Année	Etudes	Ouverture fissure (µm)	Enrobage (mm)	Initiation
Fissure unique	2001	(Mohammed et al., 2001)	100	25	✓
			200	25	✓
			300	25	✓
	2010	(Otieno et al., 2010)	400	40	✓
			700	40	✓
	2007	(Scott et Alexander, 2007)	200	20	✓
			700	20	✓
			200	40	✓
			700	40	✓
	2014	(Berrocal et al., 2015)	100	30	✓
200			30	✓	

			300	30	✓
			400	30	✓
	2020	(Bernachy-Barbe et al., 2020)	500	32	✓
			300	32	✓
			100	32	X
			300	17	✓
	1996	(Coppola, 1996)	30	30	X
			200	30	X
			300	30	✓
			1000	30	✓
	2000	(Li, 2000)	50	25	X
			100	25	✓
			200	25	✓
Annulaire	2012	(François et al., 2012)	20	22	✓
Multi fissuré (flexion)	1980	(O'Neil, 1980)	400	19	Endommagement généralisé
	1991	(Misra et Uomoto, 1991)	500	10	Endommagement généralisé
	1999	(François et Arliguie, 1999)	50	40	X
			150	40	X ou ✓
			200	40	X ou ✓
			400	40	✓
			500	40	✓
	2020	(Zhang et al., 2020)	200	26	X ou ✓
			150	26	X ou ✓
Multi fissuré (traction)	1980	(Okada et Toyooki, 1980)	100	15	✓
			200	15	✓

1.2.1.3 Propagation d'une activité de corrosion en présence de fissure

Si la littérature s'accorde sur l'influence des fissures sur l'initiation d'un site anodique, leur influence sur son développement fait encore largement débat (Beeby, 1978), (Boschmann Käthler et al., 2017), (Kanavaris et al., 2023), (Pacheco et Polder, 2012), (Jacobsen et al., 1998), (Shaikh, 2018), (Schießl et Raupach, 1997), (Robuschi et al., 2022), (Ferreira et al., 2012).

Cette opposition découle de la comparaison d'études apportant des conclusions différentes. Si l'on considère uniquement le modèle de Tuutti, la propagation de la corrosion résultant de la création d'un site anodique conduirait rapidement à la ruine de l'ouvrage (Tuutti, 1982). Cette vision, en deux phases, conduit à étendre sur le long terme l'évaluation de l'influence des fissures sur la propagation de la corrosion évaluée à court terme. Cependant, sur le long terme, la disponibilité des éléments nécessaires à une activité de corrosion significative peut varier : phénomènes de transferts dans les fissures, colmatage de la fissure par les produits de corrosion ou d'auto-cicatrisation sont autant de paramètres influençant la cinétique en zone fissurée, mais également en zone non-fissurée. L'étude de l'influence des fissures sur la propagation d'une activité de corrosion en fond de fissure impose donc de conduire des essais sur des durées significatives. Ici, on note que cette étude bibliographique porte sur des durées inférieures à 2 ans et jusqu'à plus de trente ans.

Pour les études à court et moyen termes (jusqu'à cinq ans) (Miyazato et Otsuki, 2010) (Ahmadi et al., 2014) (Okada et Toyooki, 1980) (Pacheco et Polder, 2012) (Poston et al., 1987) (Montes et al., 2004) (Otieno et al., 2010) (Ramm et Biscopig, 1998) (Scott et Alexander, 2007) (Jaffer et Hansson, 2008) (Paradis, 2009) (Kobayashi et Kojima, 2017) (Ji et al., 2016) (Blagojevic, 2016) (Otieno et al., 2012) (Poursaei et Hansson, 2008) (Marcotte et Hansson, 2003) (Michel et al., 2016) (Otieno et al., 2016) (Otieno et al., 2015), on note une grande variété de dispositifs expérimentaux, compositions des bétons, enrobages, conditions d'exposition aux chlorures, méthodologies de suivi de la corrosion en zone fissurée et/ou en zone saine. Ici, il faut noter que l'absence de consensus sur les protocoles expérimentaux mis en place rend particulièrement complexe la confrontation des résultats. Ce dernier point souligne l'importance et la nécessité de s'accorder sur un protocole commun offrant une base de comparaison similaire.

Le nombre d'études réalisées sur des durées supérieures à 5 ans est largement inférieur, du fait de la complexité associée à la maintenance de ce type de dispositif expérimental (Ramm et Biscopig, 1998) (Mohammed et al., 2002). Ces études mettent en lumière la compétition qu'il peut exister, au sein d'un même élément (poutre), entre zone fissurée et zone non fissurée : pour des bétons présentant de faibles performances (vis-à-vis de la diffusion des chlorures), les dommages en zone non fissurée peuvent, sur un temps long, se révéler plus préjudiciables que ceux constatés au droit des fissures.

Certaines études et/ou certains auteurs semblent trouver des résultats apparemment opposés : la fissuration a une influence sur la propagation de la corrosion ou a contrario une influence plus limitée, voire inexistante, avec parfois un effet « seuil de fissuration » entre ces deux résultats.

Notons cependant que la bibliographie s'accorde sur le fait que l'activité de corrosion d'un béton fissuré est indissociable des performances liées aux propriétés de transfert du béton ainsi qu'à l'enrobage.

La disparité des résultats de la littérature s'explique par le fait que le paramètre indispensable, l'ouverture de la fissure au niveau de l'armature, n'est pas évalué expérimentalement dans la plupart des références. Il existe probablement une ouverture de fissure limite au niveau de l'acier au-delà de laquelle la propagation de l'activité de corrosion devient significative.

1.2.2 Mécanismes de corrosion en fond de fissure

En fond de fissure du béton armé, la corrosion de l'acier est associée à deux mécanismes distincts (Bamforth, 1997).

Le mécanisme de macro-pile (ou corrosion localisée) correspond à l'établissement d'un couplage galvanique entre zones actives (en fond de fissures) très localisées et zones étendues exclusivement passives (armatures saines) distantes. Ce processus électrochimique repose donc sur la présence de quatre paramètres : l'existence d'une activité anodique et cathodique et la possibilité d'un transfert ionique et électronique.

Le mécanisme de micro-pile (ou corrosion uniforme) diffère car l'acier se dégrade de manière relativement homogène sur toute sa surface exposée. La corrosion est « généralisée » car la

dépassivation, la diffusion d'oxygène, les conditions électrolytiques et les propriétés métallurgiques sont globalement similaires sur toute la surface de l'acier. Sans gradients forts, les réactions anodiques et cathodiques existent partout en même temps, ce qui produit une corrosion uniformément répartie. Cependant, cette corrosion reste théorique mais on peut s'en approcher dans le cas de la corrosion par carbonatation, même si des hétérogénéités sont toujours présentes (granulats, enrobage, défaut de l'acier...) qui font que la corrosion n'est jamais parfaitement uniforme.

La différenciation entre ces deux mécanismes peut s'établir à partir de considérations phénoménologiques ou spatiales. Ainsi, dans la littérature, le terme de « micro-pile » peut être utilisé pour désigner un mécanisme phénoménologique similaire à celui d'une petite macro-pile (surfaces actives et passives distinctes mais proches ou très proches), mais sur un petit volume (Mohammed et al., 2001), (Miyazato et Otsuki, 2010), (Hansson et al., 2006). Le terme de micro-pile peut également faire référence à un mécanisme de corrosion uniforme où sites actifs et passifs sont confondus : une zone de corrosion comprend à la fois des sites actifs et passifs impossibles à différencier spatialement (Bamforth, 1997).

Statuer sur la prévalence, en fond de fissure, de l'un de ces mécanismes constitue un enjeu capital lorsque l'on questionne la durabilité des structures vis-à-vis d'une activité de corrosion. En effet les propriétés de transfert du béton (résistivité) conditionnent l'ampleur d'un contrôle ohmique de l'activité de corrosion par macro-pile.

L'utilisation d'armatures segmentées a permis de mettre en évidence le comportement anodique et cathodique des segments respectivement situés en fond de fissure et en zone saine (Bi et Subramaniam, 2006 ; Mohammed et al., 2001), (Mohammed et al., 2003). A partir de configurations expérimentales similaires, Mohammed et al. confirment la coexistence d'une activité de macro-pile et micro-pile en fonds de fissure et établissent l'influence significative du rapport E/C sur la répartition entre ces deux mécanismes (Mohammed et al., 2003). Dans un contexte de contamination par des chlorures, les travaux de Hess tendent à montrer la prévalence du phénomène de macro-pile en fond de fissure du béton (Hess, 2024). Cependant lorsque l'activité de corrosion est liée à une carbonatation prématurée du béton au voisinage des lèvres de la fissure, les travaux de Nguyen et al. (2022) montrent une part significativement plus élevée de l'activité de micro-pile en fonds de fissure.

1.2.3 Rôle des conditions environnementales

Il convient ici de distinguer l'influence des conditions environnementales d'une part sur les cinétiques de pénétration des agents agressifs et d'autre part sur les cinétiques de corrosion.

Par la fracture qu'elles constituent, les fissures offrent aux agents agressifs un chemin préférentiel accélérant leur pénétration au sein du béton. Cette pénétration par le réseau de fissures est indépendante des conditions environnementales. Plus précisément, les propriétés de transport dépendent fortement de la taille des fissures et du type de fissure, localisée ou diffuse (Djerbi et al., 2023 ; Fabien et al., 2021). En revanche, la pénétration des agents agressifs dans le béton sain dépend fortement des conditions hydriques et de la température (Ben Fraj et al., 2012 ; Touil et al., 2017). L'influence des conditions environnementales sur les cinétiques de pénétration des agents agressifs est donc surtout primordiale en zone saine lorsque la pénétration des agents agressifs intervient à travers la contamination du béton d'enrobage. C'est dans ce sens que s'inscrit la définition des différentes classes d'exposition pour les ouvrages associés à un risque de développement d'une activité de corrosion (XC ; XS et XD).

Des études récentes ont montré l'influence des conditions environnementales directement sur les cinétiques de corrosion. (Ramirez et al., 2023) recensent que les conditions hydriques les plus préjudiciables à la progression du front de carbonatation se situent autour de 60%. Par ailleurs, il a été constaté que les courants de corrosion de macro-pile sont maximum pour des degrés de saturation proche de 80 %. Pour des spécimens mono-fissurés, Hess (2024) constate une forte dépendance des cinétiques de courants de corrosion à l'état hydrique de la fissure. Le séchage des lèvres de la fissure

conduit systématiquement à une réduction des cinétiques de corrosion. Hess et al constatent également que la présence d'un film d'eau à la surface du béton conduit à une redistribution des lignes de courant ioniques du volume de béton vers le film d'eau en surface. Dans ces conditions (surface humide), la résistivité du béton ne permet plus un contrôle ohmique de l'activité de corrosion permettant aux sites actifs de mobiliser des zones passives fortement éloigné. Ainsi si l'on considère uniquement l'influence des conditions environnementales sur les cinétiques de corrosion, une partie d'ouvrage classé XS2 (immergée en permanence) pourrait induire des cinétiques de corrosion plus importante qu'en classe XS3 (alternance humidité-séchage, en zone de marnage par exemple). Il conviendrait donc pour une future étude d'analyser les deux zones : zone immergée en permanence et zone de marnage.

1.2.4 Conclusions partielles

Il est aujourd'hui bien établi qu'une fissure crée un site anodique propice à l'initiation de la corrosion, mais peu d'études parviennent à quantifier précisément cette influence selon la densité ou la morphologie du réseau de fissures. Les limites proviennent souvent de l'absence de spécimens de référence non fissurés ou d'une fréquence de mesure insuffisante pour détecter l'instant exact de l'initiation. La littérature converge également vers l'idée qu'il n'existe aucune corrélation directe entre l'ouverture de fissure en surface et la réduction du délai avant l'initiation, alors même que de nombreuses études ont montré l'impact marqué de l'ouverture de fissure sur la pénétration des agents agressifs, via l'augmentation des coefficients de diffusion des chlorures ou de la perméabilité aux gaz. Plusieurs travaux expérimentaux montrent en outre que, au droit de l'armature, l'initiation de la corrosion est quasi immédiate — en quelques semaines — quelles que soient les ouvertures de fissure en surface selon certains auteurs. Ceci paraît contradictoire avec des études sur la pénétration des ions chlorure en milieu fissuré qui ont montré que, pour des fissures inférieures à 80 μm , le coefficient de diffusion reste inchangé.

Les études ont montré que les macro-piles et micro-piles peuvent coexister en fond de fissure et leur répartition dépend fortement du rapport eau/ciment. En environnement chloruré, une domination du mécanisme de macro-pile est observé en fond de fissure. À l'inverse, lorsque la corrosion résulte d'une carbonatation localisée au voisinage des lèvres de fissure, une contribution nettement plus importante du mécanisme de micro-piles est observée. Il a été montré que les conditions hydriques influencent directement la vitesse de corrosion. En effet, les courants de corrosion sont maximaux lorsque le taux de saturation atteint 80 %. Dans le cas de fissures localisées, le séchage de la fissure réduit systématiquement la vitesse de corrosion. Lorsque la surface du béton est recouverte d'un film d'eau, les flux ioniques se déplacent vers ce film, et la résistivité du béton ne limite plus la corrosion. Cela permet à des zones anodiques d'activer des zones cathodiques plus éloignées, augmentant la corrosion. Donc, dans les zones complètement immergées on peut avoir une corrosion active en fond de fissure.

L'analyse des références révèle une lacune significative concernant la caractérisation du réseau de fissures. En effet, les informations disponibles sont insuffisantes pour établir un lien clair entre la taille et la forme du faciès de fissuration, d'une part, et les processus d'incubation, de dépassivation et de propagation de la corrosion, d'autre part. Ce verrou expérimental doit être levé dans le cadre de ce PN.

1.2.5 Effets du colmatage naturel et de l'autocicatrisation

Plusieurs mécanismes peuvent engendrer une fermeture partielle ou complète des fissures du béton. Différents termes peuvent être employés pour qualifier cette fermeture selon son origine : « colmatage » ou « cicatrisation ». Le terme « colmatage » renvoie généralement à une fermeture due à un apport de matières extérieures au matériau (particules solides), ou même internes (produits issus de la corrosion). Le terme « cicatrisation » désigne couramment le remplissage d'une fissure par une phase solide issue de réactions chimiques. A notre connaissance, il n'existe pas de terminologie «

officielle » pour différencier les différentes formes de fermeture de fissure. La Rilem a tout de même proposé des définitions dans un état de l'art qui a fait le point en 2013 des connaissances sur le « self-healing » (qu'on peut traduire par « auto-réparation », « auto-cicatrisation » ou « auto-guérison ») (de Rooij et al, 2013).

La fermeture d'une fissure peut avoir une origine naturelle. C'est le cas de l'auto-cicatrisation, un phénomène endogène constaté par l'Académie des Sciences dès le 19^e siècle selon (Amoorezaei et Ghanbari-Ghazijahani, 2025). Il a été observé que sur les parois d'une fissure, les anhydres du ciment (en quantité non négligeable car le degré d'hydratation dépasse rarement 80 %) peuvent réagir avec l'eau s'infiltrant dans la fissure. Lorsqu'une structure en béton fissurée est soumise à la pluie, le ciment resté à l'état anhydre peut « s'autoréparer » par hydratation. L'auto-cicatrisation peut aussi être le résultat de la carbonatation, réaction entre le CO₂ de l'air et les hydrates du ciment. Les précipités résultant de cette réaction, principalement des carbonates de calcium, qui ont un volume plus élevé que celui des réactifs solides, remplissent ainsi la fissure.

L'auto-cicatrisation a une double conséquence. D'une part en refermant la fissure, elle l'étanchéfie, au moins partiellement, limitant les échanges possibles avec le milieu extérieur ; d'autre part, elle tend à augmenter les performances mécaniques de l'élément fissuré. La mise en évidence de l'auto-cicatrisation est réalisée, notamment en laboratoire, en étudiant ces bénéfices : la baisse de la perméabilité à l'eau et de la diffusivité (Ranaivomanana et al, 2013), les regains mécaniques caractérisés par des augmentations de module élastique et/ou de résistance à la traction (Hilloulin et al., 2016). L'auto-cicatrisation peut également être observée directement par des méthodes optiques (de Rooij et al., 2013).

L'ampleur des bénéfices associés à l'auto-cicatrisation dépend de nombreux paramètres, comme l'ouverture et la géométrie initiale de la fissure, la quantité d'anhydres/hydrates présents dans la fissure, l'âge du béton, la nature du liant, les conditions d'exposition, etc. La présence d'eau dans la fissure est néanmoins un élément essentiel à l'auto-cicatrisation, qu'elle soit due à l'hydratation ou à la carbonatation. Concernant l'ouverture de fissure, il est difficile d'après Kanavaris et al., 2023, de définir une ouverture maximale à partir de laquelle l'auto-cicatrisation n'a plus d'effet bénéfique. D'après Edvarsen, 1996, cité par Kanavaris et al., 2023, une auto-cicatrisation complète peut toujours se produire pour une fissure de 0,2 mm.

L'étude de l'auto-cicatrisation a donné naissance à des technologies innovantes pensées pour favoriser ou imiter le phénomène. La formulation des « engineering cementitious composites » (BHP fibrés, bétons de poudres réactives, faible E/C, fort dosage en ciment) est optimisée par exemple pour augmenter la capacité du matériau à s'autoréparer, e.g., (Chen et al., 2025). La fermeture des fissures sort dès lors du champ du phénomène naturel. Une bonne part de la littérature est dédiée aujourd'hui aux études de la cicatrisation artificielle dite « autonome » par opposition à la cicatrisation naturelle. Citons par exemple la cicatrisation par introduction de microcapsules contenant des polymères libérés par la fissuration (Araújo et al, 2018) ou la bio-cicatrisation consistant à introduire des bactéries provoquant une précipitation de carbonates de calcium à l'image de la carbonatation (Lors et al., 2017).

Le colmatage des fissures par des particules fines, issues de l'extérieur (éléments en suspension dans l'eau) ou de l'intérieur (débris de la fissuration), est aussi un phénomène naturel, dans le sens où il n'est pas contrôlé. D'après (de Rooij et al., 2013), les bénéfices de ce colmatage mécanique sont mineurs comparés à ceux de l'auto-cicatrisation.

Une autre forme de colmatage a été mise en évidence par Ghantous et al., 2017 dans le cas d'un béton soumis à la carbonatation. Les fissures peuvent être remplies par les produits de corrosion des armatures en acier dans la zone où les fissures et armatures s'interceptent. Lors du chargement mécanique, le comportement attendu du béton armé est une fissuration de la zone tendue où les efforts de traction seront repris par les armatures. Les fissures sont donc des voies préférentielles pour les agents agressifs comme le CO₂. Ghantous et al., 2017 ont observé un scellement des fissures (de largeur jusqu'à 500 µm) lors du processus de corrosion. Ce scellement a eu pour conséquence de ralentir la corrosion initiée préalablement par la carbonatation et des cycles d'humidification/séchage.

Selon les auteurs, une barrière a été créée contre le transfert des agents de corrosion que sont l'eau et le dioxygène. Ce résultat va dans le sens du scénario proposé par Tuutti (1982) d'un possible colmatage des fissures par les produits de corrosion, puis d'une repassivation des aciers dans le cas de la carbonatation. (Tremper, 1947) avait fait ces mêmes observations sur éprouvettes de béton armé carbonatées en extérieur pendant 10 ans.

1.2.6 Modèles existants et leurs limites

Lorsque le béton présente des fissures préexistantes, celles-ci jouent un rôle déterminant : elles facilitent l'entrée des agents agressifs, accélèrent l'initiation de la corrosion, et modifient la localisation ainsi que la morphologie de la couche de produits de corrosion. Les fissures deviennent alors à la fois un réservoir, un chemin préférentiel de transport et une zone d'accumulation des produits de corrosion, modifiant ainsi la pression exercée sur l'enrobage et la propagation ultérieure de nouvelles fissures (Liu & Weyers, 1998) (Guzman et al., 2012).

Dans ce contexte, la modélisation numérique constitue un outil pertinent pour prédire le moment d'initiation de la fissuration, son évolution spatiale et temporelle, ainsi que la durée de vie résiduelle des structures endommagées. Les familles de modèles varient du simple modèle analytique d'anneau pressurisé aux formulations couplées chemo-mécaniques récentes (modèles phase-field ou couplages CDM–XFEM), capables de représenter l'interaction entre la diffusion des espèces d'ions, les réactions électrochimiques, la précipitation des produits de corrosion et la fissuration du béton (Wei et al., 2021) (Jin et Yu, 2022). L'objectif de cette partie est de proposer une synthèse approfondie des principales familles de modèles utilisés pour simuler la fissuration induite par la corrosion, en mettant en évidence leurs principes fondamentaux, leurs atouts et leurs limites, ainsi que leur capacité à représenter des cas de figures où des fissures initiales sont déjà présentes dans le béton.

1.2.6.1 Mécanisme de la corrosion induite dans le béton fissuré

La compréhension des mécanismes de corrosion dans le béton fissuré est essentielle pour évaluer correctement la durabilité des structures existantes. Les fissures préexistantes modifient profondément les processus physico-chimiques menant à l'initiation et à la propagation de la corrosion, ainsi que les mécanismes de fissuration induits ultérieurement par la formation des produits de corrosion.

Dans un béton sain, la diffusion des ions chlorure, dioxyde de carbone et oxygène est principalement contrôlée par la microstructure de la matrice cimentaire et par la tortuosité du réseau poreux. En présence de fissures, ce comportement est profondément modifié : les fissures agissent comme des voies de transport préférentielles, caractérisées par une conductivité plus élevée et une moindre résistance au flux des espèces agressives. Leur géométrie, leur ouverture et leur connectivité conditionnent directement la vitesse de pénétration des chlorures et des gaz corrosifs (Seetharam et al., 2019).

De plus, la présence de fissures peut créer des gradients locaux d'humidité et de concentration, favorisant des cinétiques hétérogènes de corrosion. Les zones adjacentes à la fissure deviennent des sites privilégiés pour l'initiation de la corrosion, contrairement aux zones plus éloignées où la diffusion reste contrôlée par la microstructure du béton (Liu and Weyers, 1998).

L'initiation de la corrosion dépend de la dégradation du film passif qui protège l'acier. Deux mécanismes principaux conduisent à cette déstabilisation : (i) la carbonatation, qui abaisse localement le pH et compromet la passivité, et (ii) la pénétration des ions chlorure, qui favorise la perforation localisée du film passif et la formation de cellules anodiques locales. En présence de fissures, ces processus sont considérablement accélérés. En effet, les fissures augmentent l'exposition directe de l'acier aux agents agressifs, ce qui a pour conséquence de réduire le temps d'initiation de la corrosion et favoriser une distribution spatiale non uniforme des concentrations en ions chlorure et dioxyde de carbone (Bhargava et al., 2006) (Liu et Weyers, 1998).

Les produits de corrosion (oxydes et hydroxydes de fer) occupent un volume supérieur à celui de l'acier initial, avec des facteurs d'expansion généralement rapportés entre 2 et 7. Cette expansion volumique induit des contraintes de traction dans le béton environnant. Dans un béton intact, ces contraintes s'accumulent progressivement dans l'enrobage jusqu'à provoquer la fissuration radiale et circonférentielle. Dans un béton fissuré, la dynamique est plus complexe. En effet, les fissures existantes agissent comme des zones d'expansion préférentielles et peuvent servir de réservoir pour les produits de corrosion, modifiant la distribution locale des produits de corrosion et la pression exercée sur la matrice (Zhao et al., 2011) (Guzman et al., 2012).

Le comportement du béton fissuré soumis à la corrosion résulte d'interactions fortement couplées entre transport (diffusion/advection dans fissures et pores), cinétique électrochimique (dépassivation, polarisation), précipitation des produits de corrosion et réponse mécanique (initiation, propagation, fermeture et ouverture/réouverture de fissures). Plusieurs remarques importantes émergent :

- **L'interaction** entre les fissures et les produits de corrosion : la fissuration accélère le transport des espèces (Cl^- , O_2), augmentant la corrosion locale. La corrosion, via l'accumulation des produits de corrosion provoque l'élargissement ou la propagation des fissures.
- **La non-uniformité spatiale** : la corrosion devient souvent localisée (pitting), et la morphologie de la couche des produits de corrosion dépend fortement de la présence et de la géométrie des fissures.
- **Les conséquences pratiques** : la combinaison {fissures + corrosion} engendre des mécanismes de dégradation qui ne peuvent être correctement représentés que par des modèles couplés (transport/chimie/mécanique) ou par des modèles explicites prenant en compte l'ouverture et l'accumulation des produits de corrosion dans les fissures entre autres (Wei et al., 2021) (Guzman et al., 2012).

Ce couplage rend la modélisation du béton fissuré sous corrosion particulièrement complexe et justifie l'emploi d'approches multiples tels que les modèles analytiques pour une estimation rapide de la dégradation et les formulations numériques couplées (éléments finis, XFEM, phase-field) pour des prédictions détaillées.

1.2.6.2 Modèles analytiques

Les modèles analytiques constituent une des familles d'outils développés pour étudier la fissuration induite par la corrosion. Ils reposent généralement sur des solutions issues de la mécanique de l'élasticité, éventuellement couplées à des hypothèses simplificatrices sur l'expansion des produits de corrosion ou le comportement du béton. Malgré leur simplicité relative, ces modèles ont joué un rôle fondamental dans la compréhension des mécanismes de fissuration et servent encore aujourd'hui de référence ou d'outil de simulation des effets de la corrosion.

▪ Principe

Les modèles analytiques représentent l'expansion des produits de corrosion comme une pression interne exercée sur l'enrobage. Généralement, la corrosion est assimilée à une dilatation ou une pression autour des armatures, équivalente à une augmentation de la section de l'armature. Le béton est souvent modélisé comme un matériau élastique, isotrope, et la fissuration est définie par l'atteinte d'une contrainte limite en traction.

Parmi les approches les plus connues figurent les modèles d'anneau ou de cylindre épais. En effet, l'idée est de considérer des géométries simples autour de l'armature. Il s'agit de formulation classique pour estimer la contrainte circonférentielle induite par une pression radiale uniforme générée par l'expansion de la couche de produits de corrosion (Liu and Weyers, 1998), (Bhargava et al., 2006), (Lun et al., 2021) (Wang et al., 2022) (Yan et al., 2024). Certains modèles introduisent des zones de propriétés distinctes (par exemple, la couche corrodée et la zone saine) (Wang et al., 2022). D'autres

introduisent des effets comme celui des armatures transversales (Yan et al., 2024) ou de défauts initiaux dans le béton (Lun et al., 2021). Des améliorations intégrant la non-uniformité de la couche de produits de corrosion (pitting / distribution gaussienne de la couche de corrosion) ont été considérées afin de rendre compte de la localisation des efforts (Zhao et al., 2011).

Finalement, ces formulations conduisent à des expressions analytiques permettant d'estimer le moment critique d'apparition de la première fissure en fonction des paramètres géométriques et mécaniques (épaisseur d'enrobage, diamètre d'armature, module d'élasticité, caractéristiques des produits de corrosion).

- Atouts

Les principaux avantages de cette famille de modèles sont :

- La rapidité et le faible coût de calcul, adaptée aux études paramétriques et au pré-diagnostic.
- La simplicité conceptuelle : les paramètres utilisés (enrobage, diamètre, module élastique, pression de corrosion) sont physiquement interprétables.
- Les formulations explicites permettant d'identifier des sensibilités (influence de l'enrobage, effet du diamètre, rôle d'une corrosion localisée).
- L'utilité normative et pratique : ces modèles servent de base pour des recommandations d'entretien, des règles simplifiées de dimensionnement ou d'évaluation de durée de vie (Liu et Weyers, 1998) (Bhargava et al., 2006).

- Limites

Les limitations notables comprennent :

- Les hypothèses mécaniques restrictives (linéarité élastique du béton, homogénéité), inadaptées pour décrire la post-fissuration et la redistribution non linéaire des contraintes.
- La représentation simplifiée de l'expansion des produits de corrosion (pression uniforme) alors que la distribution réelle est souvent non-uniforme et influencée par la chimie locale et la présence de fissures (Zhao et al., 2011).
- L'absence du couplage transport/réaction/mécanique. En effet, il n'y a pas d'évolution spatio-temporelle des ions chlorure et, oxygène ou des ions ferreux en relation directe avec la mécanique.
- La géométrie limitée rend complexe la prise en considération des réseaux d'armatures, des géométries 3D complexes ou des fissures de géométrie arbitraire sans recourir à des approximations empiriques.
- Ces modèles ne sont pas capables de décrire la propagation des fissures et l'effet réservoir des fissures ouvertes pour les produits de corrosion.

- Capacités à considérer des fissures initiales

Les modèles analytiques sont peu adaptés pour représenter fidèlement des fissures préexistantes, pour les raisons suivantes :

- La géométrie de la fissure est non représentable analytiquement sauf pour des cas très idéalisés. La présence d'une fissure modifie fortement le champ de pression local et le chemin de transport des espèces.
- L'effet réservoir des produits de corrosion dans une fissure ne peut être capté que de façon très approximative (paramétrisation empirique de la pression).
- La réouverture et la propagation des fissures en interaction avec les produits de corrosion ne peuvent être simulées.

En pratique, les modèles analytiques peuvent toutefois être utilisés comme point de départ pour l'estimation rapide du seuil de fissuration, les études de sensibilité et paramétriques, ou encore comme outil de calibration initial pour des modèles numériques plus sophistiqués (éléments finis couplés, phase-field, XFEM).

1.2.6.3 Modèles éléments finis « smeared crack » (endommagement / plasticité)

- Principe

Les modèles de type « smeared crack » représentent la fissuration de manière diffuse dans le béton à travers une loi constitutive non linéaire combinant endommagement et/ou plasticité. L'effet de la corrosion est modélisé comme une expansion volumique autour de l'armature, simulée par un déplacement radial, une pression ou une analogie thermique. La fissuration n'est pas représentée explicitement, mais intégrée directement dans le modèle constitutif du béton.

(Du et Jin, 2014) proposent un modèle mésoscopique 2D distinguant agrégats, matrice cimentaire et ITZ (« Interfacial Transition Zone », c'est-à-dire auréole de transition entre pâte et granulat), permettant de décrire la dégradation de la rigidité du béton due à la microfissuration, les déformations irréversibles et l'expansion uniforme des produits de corrosion. (Thybo et al., 2017) utilisent un modèle 2D de type « smeared crack » tenant compte de la pénétration des produits de corrosion, de la dégradation progressive de la rigidité, du fluage et des propriétés mécaniques des produits de corrosion. Et l'expansion due à l'accumulation des produits de corrosion est modélisée comme une déformation imposée autour de l'acier par une analogie thermique (dilatation) et de manière non-uniforme. Dans le modèle 2D développé par (Zhang et al., 2017), la dégradation de la rigidité du béton en traction et en compression est considérée. Pour limiter la sensibilité au maillage, (Zhang et al., 2017) ont introduit une régularisation par énergie de fissuration au sein d'un modèle endommagement/plasticité de béton. L'interface a été modélisée uniquement pour transférer la contrainte de compression radiale en introduisant des éléments de contact unidimensionnels avec une rigidité extrêmement élevée en compression, mais nulle en tension le long de la direction radiale. Et l'expansion des produits de corrosion a été simulée par un déplacement radial non-uniforme.

Des approches plus récentes et de surcroît 3D, telles que celles de (Shen et al., 2019) et (Chauhan et al., 2023), couplent l'action de charges mécaniques permanentes avec une corrosion non uniforme. Le modèle de (Shen et al., 2019) propose une modélisation basée sur le concept d'une élasticité endommageable isotropique combinée à une plasticité en compression et en traction isotropique. (Chauhan et al., 2023) fait appel au même type de modèle de béton que (Shen et al., 2019) mais basé sur l'écrasement en compression et la fissuration en traction. L'expansion est modélisée par un champ de température. Cette expansion est obtenue à partir du taux de corrosion basé sur un modèle électrochimique de corrosion influencé par l'environnement local (variation de la température environnementale et de l'humidité relative), les concentrations en ions chlorure, le comportement anodique et cathodique. Enfin, (German and Pamin, 2023) et (Kagermanov and Markovic, 2023) développent des modèles combinant un comportement endommageable-plastique pour le béton, un comportement élastoplastique pour l'acier et une loi (cohesive element) de traction pour le comportement des produits de corrosion à l'interface acier/béton. Comme dans le modèle de (Chauhan et al., 2023), leur modèle de béton suppose que les deux principaux mécanismes de rupture sont la fissuration et l'écrasement. Ces caractéristiques sont définies séparément pour la traction et la compression. La régularisation du modèle est réalisée par un paramètre viscoplastique pour éviter la divergence de calculs prématurés.

- Atouts

Les principaux avantages de cette famille de modèles sont :

- Son adaptation aux éléments structuraux complets (2D/3D, fins ou grossiers).
- Son implémentation dans des logiciels standards (Abaqus, DIANA, etc.).
- Son coût de calcul raisonnable pour des études paramétriques ou de dimensionnement.

- Sa capacité à modéliser la dégradation progressive du béton et la redistribution des contraintes.

Les limitations notables sont :

- Les fissures initiales peu ou pas représentées explicitement, mais qui peuvent être intégrées dans la modélisation par une zone endommagée ou un module réduit restant toutefois approximatif.
- La sensibilité des modèles au maillage sans régularisation appropriée.
- Le transport accéléré des ions et/ou l'accumulation des produits de corrosion dans les fissures non prise en compte.
- L'effet de réservoir des fissures ouvertes mal représenté.
- Capacités à considérer des fissures initiales

Les fissures préexistantes peuvent être introduites comme zones endommagées, mais la géométrie exacte et l'effet réservoir ne sont pas explicitement modélisés. L'approche approximative adaptée pour l'étude structurelle globale peut être considérée mais est limitée pour les simulations fines du transport et de la propagation de fissures.

1.2.6.4 Modèles à fissure explicite (éléments cohésifs, discrete crack, XFEM)

- Principe

Ces modèles représentent explicitement la géométrie des fissures via des éléments cohésifs, des zones discrètes de séparation ou la méthode XFEM. Il est possible de simuler l'accumulation des produits de corrosion dans les fissures et leur expansion autour de l'armature, entraînant ainsi la propagation des fissures existantes ou l'initiation de nouvelles. Cette expansion est généralement générée via une dilatation.

Dans les approches fondées sur les éléments cohésifs, (Guzman et al., 2012) décrivent les fissures par des éléments insérés dans le maillage avec une loi de cohésion traction-séparation et sans nécessiter de remaillage. Le modèle décrit par (Guzman et al., 2012) est un modèle embedded cohesive crack 2D capable de considérer les propriétés des produits de corrosion (proche de celle de l'acier), le taux de corrosion ainsi que la pénétration des produits de corrosion dans les fissures ouvertes durant le processus de corrosion et le fluage.

Les modèles lattice (en réseau) de (Grassl et Davies, 2011) et (Savija et al., 2013) simulent quant à eux la rupture progressive des éléments liants (barre ou ressort), permettant une représentation discrète de la fissuration. La fissuration apparaît donc par suppression progressive des éléments, selon un critère (traction maximale par exemple). Le comportement est supposé linéaire mais pourrait être non linéaire pour mieux appréhender le comportement du béton. La corrosion est modélisée comme une expansion locale / pression.

À l'échelle mésoscopique, (Seetharam et al., 2019) et (Xi et al., 2019) utilisent des modèles 2D/3D incluant l'ITZ et des éléments cohésifs de type zero-thickness pour représenter explicitement les fissures. Dans la modélisation de (Seetharam et al., 2019), par simplification, ce sont des granules de forme circulaire qui ont été considérés, alors que dans (Xi et al., 2019), la forme des granules est prise sous forme de polygones aléatoires comportant 3 à 7 côtés. Par ailleurs, ce dernier modèle permet de considérer l'expansion des produits de corrosion grâce à Von Mises. Il a été sélectionné par préférence aux modèles Quadratic (Pan et al., 2012), Ellipse (Yuan and Ji, 2009), Gaussian (Zhao et al., 2011 & 2016). La « zone poreuse » (porous zone) dans laquelle s'accumulent les produits de corrosion avant de générer des contraintes dans le béton d'enrobage est considérée dans les modèles de (Seetharam et al., 2019) et (Xi et al., 2019).

Enfin, (Jin et Yu, 2022) proposent une approche hybride CDM–XFEM. Cette approche décrit le comportement du béton par une formulation d'endommagement continu (Continuum Damage

Mechanics, CDM) qui est capable de considérer l'initiation et la propagation diffuse des microfissures via un paramètre d'endommagement qui réduit la raideur locale. Ils couplent ce CDM avec une formulation XFEM permettant l'apparition et la propagation explicite de discontinuités dans le maillage sans remaillage. Dans leur modélisation, des fissures transversales préexistantes (géométrie/largeur) sont intégrées explicitement dans le maillage afin d'analyser leur influence sur le transport d'eau et la pénétration des ions chlorure dans le béton, et donc sur la corrosion et son expansion.

- Atouts

Les principaux avantages de cette famille de modèles permettent de :

- Simuler l'ouverture réelle de fissure, la progression et l'accumulation des produits de corrosion.
- Représenter l'hétérogénéité du béton (granulats, matrice, ITZ).
- Considérer la géométrie explicite des fissures initiales.
- Coupler le transport et la chimie locale.

- Limites

Les limitations notables comprennent :

- La mise en place d'un maillage fin requis : un coût numérique élevé, surtout en 3D.
- La calibration des lois cohésives qui peut être complexe, surtout en présence de corrosion.
- La difficulté à considérer les réseaux de fissures denses ou les géométries complexes.

- Capacités à considérer des fissures initiales

Les fissures préexistantes peuvent être intégrées directement dans le maillage avec leur géométrie et la largeur réelle, permettant de modéliser leur influence sur le transport d'eau, la pénétration des ions chlorure, et l'évolution des produits de corrosion.

1.2.6.5 Modèles à champ de phase (phase-field)

- Principe

Les méthodes phase-field (champ de phase) représentent la fissure par un champ scalaire continu $d(x) \in [0,1]$ plutôt que comme discontinuité géométrique. Elles permettent de modéliser l'initiation, la propagation et la ramification des fissures dans des matériaux quasi-fragiles comme le béton, avec la possibilité d'intégrer le couplage chemo-mécanique (transport, corrosion, expansion des produits, fissuration du béton). Dans ce cadre, $d = 0$ correspond à un matériau sain, $d = 1$ à un matériau entièrement fissuré, et $0 < d < 1$ à une zone de transition diffuse. Ces modèles reposent sur la formulation énergie de Griffith régularisée, différentiable, ce qui facilite la résolution numérique.

Les approches de (Wei et al., 2021) et de (Fang et al., 2023a, b) présentent de fortes similitudes. Elles couplent toutes deux la diffusion des ions chlorure et oxygène, les réactions électrochimiques à la surface de l'acier, la formation et l'expansion des produits de corrosion ainsi que la fissuration induite dans le béton. Ces modèles tiennent compte de la variation de la diffusivité des ions chlorure et oxygène causée par la fissuration du béton. Dans le modèle 2D de (Wei et al., 2021), la diffusion de l'oxygène dissous à l'interface acier/corrosion est directement liée à l'expansion des produits de corrosion, tandis que la fissuration du béton d'enrobage dépend de l'évolution de cette expansion générant une pression radiale. Les propriétés mécaniques et diffusives du béton y sont considérées homogènes. De leur côté, (Fang et al., 2023a, b) introduisent une approche 2D/3D dans laquelle la perte de section d'acier gouverne un déplacement imposé représentant l'expansion des produits de corrosion. Les granulats sont modélisés comme un matériau élastique de forme circulaire en 2D et

sphérique en 3D, tandis que la matrice cimentaire et l'ITZ suivent le modèle de zone cohésive régularisé par champ de phase de Wu et Chen (2022).

D'autres études s'intéressent plus spécifiquement à la prise en compte de l'hétérogénéité du béton. (Hu et al., 2022) développent un modèle mésoscopique à trois phases (granulats, mortier, ITZ), où les granulats sont représentés par des polygones de tailles aléatoires comportant 4 à 13 côtés. L'expansion, supposée non uniforme, est introduite via un déplacement imposé tenant compte de la zone poreuse autour de l'armature. Tandis que (Xia et al., 2024) enrichissent la méthode phase-field en intégrant explicitement les effets de compression et de cisaillement dans le comportement du béton. Cela signifie que le modèle ne se limite pas à la fissuration en mode "traction pure". Par ailleurs, le béton est considéré comme un matériau homogène dans une première phase, et dans la seconde, le béton est modélisé avec des granulats polygonaux, une matrice cimentaire et un ITZ afin de considérer les effets de l'hétérogénéité du béton sur le chemin de la fissuration. L'expansion des produits de corrosion est considérée non uniforme et déterminée par une relation dépendant de la perte de section comme souvent dans la littérature.

(Korec et al., 2023, 2024) proposent un modèle chemo-mécanique 2D tenant compte du transport de Fe^{2+}/Fe^{3+} dans les pores de la matrice cimentaire, de l'oxydation des ions Fe^{2+} en Fe^{3+} , de la précipitation des produits de corrosion dans la zone poreuse, ainsi que leur expansion. Cependant, l'hétérogénéité du béton n'a pas été considérée dans le modèle.

- Atouts

Les principaux avantages de cette famille de modèles permettent de :

- Simuler l'initiation, la propagation et la ramification des fissures sans remaillage.
- Intégrer les fissures existantes et le transport modifié par les fissures.
- Considérer un couplage physico-chimique complexe (transport, corrosion, fissuration).
- S'adapter aux phénomènes non uniformes et aux effets mésoscopiques.

- Limites

Les limitations notables comprennent :

- Un coût numérique qui peut être élevé, surtout en 3D.
- Une implémentation complexe et encore peu utilisée en ingénierie courante.
- Une calibration des paramètres (épaisseur de fissure, énergie de fracture) délicate.
- Capacités à considérer des fissures initiales

Les fissures initiales peuvent être représentées par un champ d'endommagement pré-initialisé, permettant la simulation de leur influence sur le transport et la corrosion. De plus, ces modèles sont adaptés à l'étude fine de l'interaction entre la fissuration et l'accumulation des produits de corrosion.

1.2.6.6 Conclusions

La fissuration du béton armé due à la corrosion des armatures est un phénomène complexe et multi-physique, combinant des interactions chimiques et mécaniques. La revue des familles de modèles numériques montre une progression historique et méthodologique :

1. Les modèles analytiques sont rapides et conceptuellement simples, utiles pour le pré-diagnostic et l'étude paramétrique, mais limités pour les fissures initiales et la post-fissuration.
2. Les modèles EF « smeared crack » sont adaptés aux structures entières avec dégradation progressive, mais les fissures initiales et le transport des ions ne sont pas intégrés.

3. Les modèles à fissure explicite (cohésifs, XFEM, discrete crack) permettent la représentation fine des fissures, la propagation et l'effet réservoir, mais le coût numérique est élevé et il est difficile de simuler des structures complexes.
4. Les méthodes phase-field sont capables de représenter l'initiation, la propagation et la ramification des fissures avec un couplage chemo-mécanique, intégrant des fissures initiales et le transport ainsi modifié. Mais elles sont encore coûteuses et complexes à implémenter.

Synthèse et perspectives :

- Les modèles analytiques restent utiles pour l'estimation rapide du moment critique de fissuration.
- Les EF « smeared crack » et à fissure explicite sont adaptés pour l'évaluation structurale et la compréhension mécanique détaillée.
- Les méthodes phase-field apparaissent comme la solution la plus prometteuse pour simuler des structures fissurées initialement, intégrant le couplage transport–chimie–mécanique et la propagation de fissures complexes.
- Les recherches futures doivent viser une meilleure intégration des processus multi-physiques, l'optimisation numérique et la validation expérimentale afin de rendre ces modèles opérationnels pour l'ingénierie courante.

1.3 État de l'art sur les essais expérimentaux

1.3.1 Méthodes de génération et de contrôle des fissures en laboratoire

De nombreux mécanismes, souvent couplés, peuvent être à l'origine de l'apparition de fissures dans le béton et le béton armé. Poursaee et al., (2022) listent ces mécanismes conformément à la classification de ACI Committee 224 selon que la fissuration apparaît à l'état plastique ou après durcissement :

- Etat plastique : retrait plastique, tassement
- Etat durci : retrait en dessiccation, contrainte thermique, réactions chimiques dont celles liées aux pathologies de gonflement : Réaction Alkali-Granulat (RAG), Réaction Sulfatique Interne (RSI), intempéries, mauvaises pratiques de construction, surcharges de construction, erreurs de dimensionnement, chargements mécaniques extérieures, corrosion des armatures.

Dans le cas des chargements mécaniques représentatifs des structures, il existe bien évidemment plusieurs types de sollicitations mécaniques qui peuvent se superposer (traction, flexion, cisaillement, torsion, compression). La fissure apparaît lorsqu'un critère d'endommagement est dépassé (par exemple Rankine en traction, Drucker-Prager en compression). La propagation des fissures peut alors se faire selon trois modes : mode I suivant la normale au plan de la fissure ; mode II parallèlement au plan de la fissure et perpendiculaire au front de fissure ; mode III - ouverture parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure. Les modes de rupture définissent le mode de propagation des fissures.

En laboratoire, les méthodes permettant de générer la fissuration concernent principalement les essais mécaniques, qui se distinguent par le type de sollicitations en statique, à court terme ou à long terme (fluage), ainsi que les essais de déformations gênées, comme le retrait, et les essais liés aux pathologies (réactions de gonflement interne par exemple).

On peut dès lors distinguer 2 familles d'essais :

- les essais mécaniques en statique qui peuvent être asservis via la mesure de l'ouverture de fissure de surface
- les autres essais pour lesquels la fissuration en surface est uniquement mesurée, avec possible suivi dans le temps.

La Figure 2 extraite du rapport norvégien de l'Administration Publique des Routes (Boschmann et al., 2017) et rappelé par Hess (2024) montre que la grande majorité des fissures étudiées sont obtenues en flexion 3 ou 4 points. La compression uniaxiale ou triaxiale conduit également à une fissuration (en mode I, I+II ou II), mais son suivi expérimental est beaucoup plus délicat, la fissuration étant diffuse, répartie dans le volume du matériau et difficilement localisable en amont de l'essai.

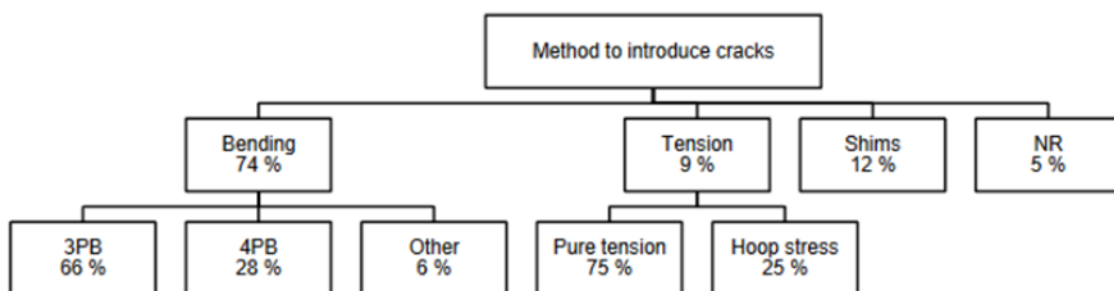


Figure 2 : Méthodes expérimentales d'introduction de fissures dans le béton - analyse statistique (Boschmann Käthler et al., 2017)

1.3.1.1 Méthode de génération de fissure

Les différents essais de génération de fissure sont classifiés dans ce paragraphe.

Essais mécaniques en statique

Les essais mécaniques peuvent être réalisés à différentes échelles : l'échelle du matériau béton, celle de l'association acier-béton, et enfin de celle de l'élément de structure.

A l'échelle du béton

La plupart des essais concernant la fissuration à l'échelle du matériau font l'objet de normes. On peut citer :

- l'essai de traction par fendage (EN 12390-6)
- l'essai de flexion de 4 points (EN 12390-5)

Toutefois, si ces essais génèrent la fissure, leur objectif est d'estimer la résistance à la traction et ils ne nécessitent pas une mesure ou une évaluation de la fissuration. D'autres essais mesurent l'ouverture de la fissure et requièrent l'asservissement de l'essai en ouverture de fissure. Ce sont notamment ceux des normes et recommandations dans le cas des bétons fibrés :

- Flexion 3 points sur prismes entaillés (EN 14651)
- traction directe RILEM TC 162-TDF.

Pour pouvoir mesurer l'ouverture de fissure et asservir l'essai via cette dernière, une entaille est réalisée au préalable afin de localiser la fissuration et de positionner le capteur utilisé pour la mesure.

A l'échelle de l'élément de béton armé

Dans le cas d'un élément en béton armé, l'essai dit tirant, permet de caractériser la capacité d'adhérence acier-béton. Il consiste à appliquer un effort de traction sur les extrémités d'une armature en acier noyé dans un prisme de béton. Des mesures de déformations peuvent être enregistrées par jauges collées sur l'armature et sur la surface de béton. Le suivi de l'apparition et de la répartition des fissures permet également de mettre en évidence cette capacité de transfert des efforts de l'acier vers le béton. Plusieurs dispositifs de mesure de ces fissures en surface (capteurs, vidéo-corrélation) sont présentés par la suite.

Des études ont investigué l'échelle de l'élément de structure, majoritairement le cas des poutres armées en flexion. Dans la plupart des cas, l'essai est piloté en force et les faciès de fissuration sont relevés en surface pour différents niveaux de chargement (Pérez Caldentey et al, 2013).

Essais sur du long terme

Le béton est un matériau dont le comportement évolue au cours du temps, sous l'effet combiné de son évolution microstructurale et des sollicitations auxquelles il est soumis. Au-delà de sa réponse instantanée, il développe des déformations différées intrinsèques sans sollicitation mécaniques, à savoir le retrait, et celles qui sont induites par un chargement mécanique maintenu dans le temps, le fluage, sachant que les amplitudes et cinétiques sont dépendantes des chronologies des sollicitations thermiques, hydriques et mécaniques, ainsi que de leurs valeurs. Ces phénomènes différés constituent un enjeu majeur pour la compréhension et la maîtrise du comportement mécanique des ouvrages en béton.

Chargement mécanique maintenu - fluage

Des études ont proposé des dispositifs originaux permettant de créer des fissures de flexion sur éléments de structures armées et les maintenir chargés, donc de les faire fluer, notamment pour étudier le développement de la corrosion et identifier le lien entre fissuration et corrosion dans des conditions représentatives des structures réelles maintenues sollicitées en flexion dans le temps. On peut ainsi citer le protocole de Michel et al., (2013), équipé d'un système associant la poutre testée en flexion avec deux cadres et un profilé, tous métalliques. Après avoir préalablement pré-fissuré des poutres armées en flexion trois points sur une presse hydraulique, le niveau de chargement est maintenu par l'intermédiaire des deux cadres en acier en serrant leurs boulons. Le niveau de chargement visé est contrôlé par un capteur de force annulaire, testés et calibrés en amont. D'autres études proposent des concepts similaires, en associant des couples d'éléments armés pour les fléchir ensemble via des cadres métalliques, avec un chargement contrôlé par serrage d'écrous (François et al., 1988 ; Jaffer et al., 2008). Pour maintenir le chargement dans le temps, tout en générant des fissures, il est envisageable d'utiliser des dispositifs équipés de bâtis de fluage, dans lesquels les pertes de pression induites par le fluage du béton peuvent être compensées par des accumulateurs d'azote, comme cela se fait pour des poutres précontraintes en flexion (Vidal et al., 2018).

Ouverture de fissure maintenue

Des chercheurs qui se sont intéressés au phénomène de corrosion et à la propagation des ions chlorure à son origine ont proposé des solutions innovantes pour maintenir l'ouverture de fissure dans le temps. Nous pouvons citer l'utilisation d'un cœur expansif qui consiste à exercer une pression interne sur un anneau de béton pour initier des fissures dont l'ouverture peut être contrôlée par cette pression, puis maintenue par la simple friction entre le cylindre conique et les six pétales coniques, une fois l'écrou et le noyau du cœur retiré. Dans ses travaux de thèse, inspirés par d'autres études (Mohammed et al., 2001 ; Poursaee et al., 2008), Hess a utilisé des cales en PolyEtherEtherKetone (PEEK), insensibles à la corrosion et transparent aux rayons X (à la place de cales en acier inoxydable), pouvant résister à des contraintes de compression très élevées (plus de 100 MPa) sans fluage significatif (Hess et al., 2022). Lors d'essais de flexion 3 points sur prismes de béton armé, lorsque l'ouverture de fissure visée est atteinte, ces cales sont insérées de chaque côté de l'entaille localisant la formation de la fissure. L'ouverture est ainsi maintenue durant tout l'essai destiné à l'étude de la corrosion de l'armature.

Cas des déformations gênées

La fissuration par déformation gênée peut avoir plusieurs causes et dépend de l'échelle d'observation. A l'échelle mésoscopique, des microfissures peuvent apparaître du fait des déformations gênées de la matrice cimentaire par le granulats, soit du fait du retrait de cette dernière, soit de déformations thermiques différentielles dans le cas d'une élévation de température (lors de l'hydratation par exemple) ou d'un refroidissement. Des contraintes de traction apparaissent et vont entraîner la formation de microfissures dès lors que la résistance locale de traction de la matrice est dépassée. A l'échelle supérieure, ces déformations gênées sont dues à un effet structural lié à des gradients de déformations dans l'épaisseur de l'élément.

Les essais de fissuration par retrait gêné sont réalisés selon des normes, notamment celle dit du retrait à l'anneau ou « ring test » (ATSM C1581-04, 2004), principalement sur des pâtes de ciment. Cet essai permet d'évaluer la sensibilité du matériau à la fissuration induite par le retrait, en imposant une contrainte mécanique par la présence d'un anneau métallique. Des jauges de déformation sont collées à l'intérieur de l'anneau afin de mesurer les déformations induites par le retrait du matériau.

L'apparition de la fissure, son instant d'initiation, ainsi que l'évolution des déformations mesurées constituent des indicateurs pertinents pour comparer les formulations, analyser l'influence des paramètres matériaux, et alimenter les modèles de comportement.

Des études se sont également intéressées à ce mécanisme via des essais originaux, notamment à l'échelle de la structure armée, plus représentative des conditions in situ (El Khoury et al., 2025). Ces travaux analysent le comportement de voiles relativement minces, retenues en pied, d'une épaisseur de 0,3 m, d'une hauteur de 0,9 m et d'une longueur de l'ordre de 5 m, et leur fissuration sous les effets concomitants et couplés de l'élévation de température due à la chaleur d'hydratation et du retrait depuis le décoffrage. La température, les déformations empêchées, et les largeurs de fissures ont été suivies pendant 3 mois. Les déformations de surface du béton ont été mesurées sur une face des voiles à l'aide de jauges DEMEC, disposées selon une grille régulière (espacement vertical de 250 mm, horizontal de 250 mm au centre et 500 mm aux extrémités). La corrélation d'images numériques a également été utilisée pour la face opposée, mais ces mesures n'ont pas été présentées en raison des difficultés d'interprétation au jeune âge. La température a été suivie à l'aide de thermocouples répartis dans l'épaisseur des voiles, du coulage jusqu'à la fin du suivi. Des capteurs à corde vibrante ont permis de mesurer les déformations internes du béton, et des capteurs de résistivité électrique ont permis de suivre les déformations dans les armatures. Les largeurs de fissures ont été relevées au microscope, avec une résolution de 0,02 mm.

Le schéma initial de fissuration en phase de jeune âge s'est révélé similaire pour les voiles, qu'ils soient dépourvus ou munis d'armatures horizontales. En revanche, le comportement ultérieur a divergé nettement : la présence d'armatures contrôle les déformations de part et d'autre des fissures et, par conséquent, limite leur ouverture. La mise en traction des armatures au droit des fissures a également limité l'effet de retrait gêné, favorisant ainsi la formation de nouvelles fissures avec l'augmentation des déformations libres de retrait.

Cas de la fissuration artificielle

La technique de la fissuration artificielle est de conserver une ouverture de fissure contrôlée dans le temps lors d'essais dans des conditions provoquant la corrosion des armatures. Ces essais avec fissuration artificielle, qui ne sont évidemment pas représentatifs des cas des éléments de structures en conditions réelles de fonctionnement, sont proposés pour tenter de décorrélérer l'influence de l'ouverture de fissure de surface, prise en compte vis-à-vis de la durabilité aux E.L.S de l'Eurocode 2 et de l'endommagement à l'interface acier-béton (SCI pour Steel-Concrete Interface). En effet, selon de nombreux chercheurs (Ganthous et al., 2017 ; Mohammed et al., 2001 ; Rossi et al., 2019), la dégradation de l'interface acier-béton en front de fissure aurait une influence bien plus importante sur le développement de la corrosion par rapport à la largeur d'ouverture de fissure qui n'aurait une influence que sur l'apparition de la corrosion.

Les méthodes pour créer une fissure artificielle reposent sur un même principe (Kondratova et al., 2003 ; Li et al., 2017). Des plaques en plastique et acier sont positionnées à l'emplacement souhaitée de la fissure artificielle et sont fixées au moule. Puis, le béton est coulé dans chacune des deux parties du moules, séparées par les plaques, à deux échéances distinctes de manière à ce que le béton ait durci dans la première partie avant de couler la seconde. La plaque acier est retirée après durcissement de la première partie et celle en plastique après celle de la deuxième partie. Les chercheurs ont ainsi réussi à gérer l'épaisseur de la fissure artificielle. D'autres utilisent une plaque en caoutchouc placés dans le coffrage avec le coulage réalisé en une seule fois, sans que la méthodologie expérimentale soit détaillée, notamment pour retirer la plaque et contrôler la largeur de l'entaille ainsi créée (Arya et al, 1996).

1.3.1.2 Techniques de contrôle de la fissuration

Les techniques de contrôle de la fissuration dans ces essais de laboratoire se limitent à la mesure de surface, permettant ainsi un contrôle pendant le déroulement de l'essai et d'asservir dans certains cas

celui-ci avec les valeurs d'ouverture de surface, notamment afin de garantir la stabilité du comportement post-pic du béton.

CMOD ou COD

Le capteur appelé CMOD (Crack Mouth Opening Displacement), ou COD, est un LVDT de type pince, dont les lames sont positionnées à cheval sur la fissure. Dans le cas de la flexion 3 points entaillée, les lames s'appuient sur les bords de l'entaille, en fibre inférieure du prisme de béton testé. Le capteur permet ainsi de mesurer l'ouverture de l'entaille et d'assurer le suivi de l'ouverture de la fissure après son apparition. Sa mesure est souvent utilisée pour asservir un essai de type EN 14651.

Corrélation d'images numériques (DIC) :

La technologie de vidéo-corrélation (DIC pour Digital Image Correlation) repose sur le principe de vision stéréoscopique par l'intermédiaire de la prise de vue de deux cameras. En comparant les images relevées à deux instants distincts, elle permet de suivre les coordonnées spatiales de l'ensemble des points et d'en déduire le champ de déplacement d'une surface de la structure qui se déforme, quelle qu'en soit l'origine (thermique, hydrique, mécanique). Le champ de déformation peut ainsi être enregistré au cours de l'essai à partir d'un état de référence. En termes de mise en œuvre, un mouchetis projeté de manière aléatoire est réalisé en surface du corps d'éprouve, afin de faciliter le suivi du champ de déplacement. Les logiciels de traitement des images proposent de définir des capteurs virtuels permettant de cibler le déplacement sur des zones d'intérêt, notamment pour le suivi des ouvertures de fissure (Destrebecq et al., 2011). Cette technique est adaptée aux conditions en laboratoire, puisqu'elle nécessite un environnement de lumière stable et maîtrisée. Son utilisation est désormais courante en laboratoire pour des essais en statique sur des durées relativement courtes.

Autres systèmes de mesure

On peut citer d'autres systèmes pour un suivi par relevé à certaines échéances de l'ouverture des fissures en surface, tels que le vidéomicroscope (Fritih et al, 2013 ; El Khoury et al, 2025) ou des capteurs LVDT.

1.3.1.3 Protocole de fissuration et interface acier béton

Comme indiqué précédemment, le protocole de fissuration retenu influence directement les paramètres suivants :

- Le nombre de fissures, leur fréquence et leur typologie
- L'endommagement de l'interface acier-béton (décohésion et/ou fissuration interne)

La formation d'une fissure fonctionnelle s'accompagne d'un endommagement mécanique de l'interface acier-béton (décohésion et/ou fissuration interne). Il a été constaté que la qualité de cette interface est un paramètre prépondérant sur le développement d'une activité de corrosion (Mohammed et al., 2002), (François et al., 2012), (Michel et al., 2013), (Ghantous et al., 2017), (Angst et al., 2019), (Michel et al., 2021), (Geiker et al., 2021), (Cai et al., 2020), (Rossi et al., 2020). Ainsi, le protocole de fissuration devrait éviter les configurations générant un endommagement excessif et donc irréaliste de l'interface acier-béton. Par conséquent, le protocole de fissuration doit permettre d'obtenir un état post-fissuration durable et représentatif de l'ouverture de fissure visible en surface, comme c'est le cas in-situ. Sur ouvrages, il existe une corrélation entre l'ouverture de fissure et l'endommagement de l'interface, puisqu'elle résulte de l'application d'un chargement maintenu. En laboratoire, il est généralement impossible de maintenir l'application d'une charge sur la durée de l'essai et l'ouverture de fissure étudiée résulte soit d'un déplacement imposé (Jaffer et Hansson, 2008), Pease et al., 2011, (Michel et al., 2013), (Carević et Ignjatović, 2019), (Zhang et al., 2020), soit elle correspond à une ouverture de fissure résiduelle obtenue après déchargement (Scott et Alexander,

2007), (Ghantous et al., 2018), soit au blocage de l'ouverture de fissure par l'insertion d'une cale métallique en acier inoxydable (Mohammed et al., 2001), (Poursaee et Hansson, 2008). Dans le cas d'un déplacement imposé, le fluage du béton et la relaxation du système peuvent conduire à une variation de l'ouverture de fissure sur la durée l'essai. Pour les fissures résiduelles, l'ouverture de fissure maximum connue par le spécimen est très significativement supérieure à l'ouverture de fissure étudiée. Ce dernier point est essentiel puisqu'il existe un lien entre l'ouverture de fissure maximale et l'endommagement de l'interface acier-béton. Ainsi, les ouvertures de fissure qui résultent de la fermeture d'une ouverture de fissure maximale, ou obtenues via le maintien d'un déplacement imposé, pourraient ne pas être représentatives de l'endommagement de l'interface acier-béton et fausser les conclusions de l'exploitation des résultats d'essais.

D'autre part, puisqu'elles ne génèrent aucun endommagement de l'interface, les fissures artificielles résultant de l'introduction d'une cale d'épaisseur calibrée dans le volume de béton à l'état frais n'ont de sens que si elles sont utilisées pour découpler les effets de l'ouverture de fissure et de l'endommagement (Zhang et al., 2020). Néanmoins, il existe également des études sur le développement de la corrosion en présence de fissure artificielle (Miyazato et Otsuki, 2010), (Montes et al., 2004), (Ramm et Biscopring, 1998), (Paradis, 2009), (Arya et Ofori-Darko, 1996), (Jiménez-Quero et Montes-García, 2010), (Li et al., 2017) mais, dans ce cas, elles ne prennent pas en compte un des paramètres les plus importants : l'endommagement de l'interface acier-béton.

Hess et al mettent au point un protocole expérimentale permettant de générer, puis de maintenir l'ouverture de fissure, sans aucun dispositif de chargement externe par la suite. Après avoir atteint l'ouverture de fissure cible en flexion 3 points, le déplacement des lèvres de la fissure est maintenu à l'aide de deux cales calibrées, insérées de chaque côté de l'encoche localisant la formation de la fissure. Ces cales plastiques confectionnées avec du PolyEtherEtherKetone (PEEK) sont insensibles à la corrosion et peuvent résister à des contraintes de compression très élevées (plus de 100 MPa) sans fluage significatif (Hess et al., 2022).

1.3.2 Méthodes d'évaluation du faciès de fissuration

Il existe de nombreuses méthodes d'évaluation de fissures du béton et des éléments des structures en béton armé, (entre autres les capteurs LVDT, type CMOD pour Crack Mouth Opening Displacement, la vidéocorrélation, la stéréophotogrammétrie, la technique des répliques, etc.). Néanmoins, la plupart ne mesurent que les ouvertures en surface, ceci pour deux raisons qui sont liées : la difficulté d'une observation en 3D dans la profondeur du béton aussi bien in situ qu'en laboratoire, et le fait que les règles de dimensionnement considèrent l'ouverture de fissures en surface de l'élément de structure comme critère principal vis-à-vis de la durabilité aux Etats-Limites de Service.

Or, le faciès de fissuration dans le béton d'enrobage au voisinage de l'armature pourrait conditionner la durée de la phase d'induction de la corrosion des armatures. Cette idée avancée par (Beeby, 1978) selon laquelle le lien entre l'activité de corrosion et l'ouverture de fissure à l'interface armature acier et béton existe, et non avec celle de surface, semble confirmée par une étude récente (Hess, 2024). Il est connu qu'entre la surface et l'interface acier-béton, une fissure évolue à travers l'épaisseur d'enrobage aussi bien en termes de valeurs que de faciès et de morphologie, avec des ramifications possibles. En outre, lors de la formation d'une fissure dans un élément armé, un endommagement mécanique se produit à l'interface acier-béton. Il correspond à des fissures secondaires dites de Goto qui les a identifiées (Goto et al., 1971), causées par la modification des transferts des efforts entre les deux matériaux de rigidité très différentes lorsque la fissure principale atteint l'armature. Ces fissures sont conditionnées par la géométrie des crénelures de l'armature à haute adhérence et la largeur de la zone d'endommagement au voisinage du fond de fissure principale dépendrait de l'intensité du chargement selon une étude sur des éléments fléchis (Pease et al, 2006). Cet endommagement aurait également une influence sur le développement de la corrosion (François et al., 1999).

Le faible nombre d'études disponibles sur l'étude des faciès de fissuration au voisinage de l'armature est corrélée à deux difficultés inhérentes à certaines méthodes d'investigation. La première réside dans la capacité à pouvoir évaluer les faciès et ouvertures de fissures sous chargement, si c'est ce type

de fissures qui est étudiée, et non après déchargement, ce qui entraîne une refermeture partielle du réseau des fissures. La seconde concerne le fait d'éviter de provoquer de nouvelles microfissures ou de modifier le faciès durant l'application du protocole expérimental. Par exemple, des procédures de préparation peuvent nécessiter un pré-séchage (Chatterji et al., 1981) qui induit des microfissures de retrait de la matrice cimentaire gêné par les granulats, perturbant dès lors le réseau de fissures que l'on souhaite analyser.

Des études récentes qui investiguent le réseau de fissures dans la masse du béton profite de nouvelles techniques mises à disposition des matériaux de construction.

Nous proposons de les présenter avec leurs avantages et inconvénients avec les différentes caractéristiques dans la perspective d'une possible mise en œuvre dans le cadre du projet.

1.3.2.1 Méthode par imprégnation

Il existe plusieurs études appliquant des méthodes d'imprégnation cherchant à caractériser la fissuration et le réseau poreux dans l'épaisseur du béton, et non uniquement en surface. Les protocoles de préparation varient, mais le principe est globalement le même. Dans le cadre d'étude sur éprouvettes de laboratoire, Il consiste, dans un premier temps, à appliquer à l'échantillon une cure humide dans une chambre à 100% d'humidité relative afin de limiter la microfissuration de retrait, ou à les immerger dans un bain éventuellement saturé en chaux pour limiter la dégradation par lixiviation. Puis, l'imprégnation est réalisée sur l'échantillon pendant ou après la sollicitation qui peut être mécanique, thermique, ou hydrique, susceptible de provoquer des fissures. Les échantillons sont ensuite découpés en tranches, généralement avec une scie à fil diamanté. Les surfaces sont ensuite polies pour l'analyse des faciès. Bien que ces protocoles légèrement distincts d'une étude à l'autre ne soient pas décrits dans cette bibliographie par soucis de rester synthétique, il n'en demeure pas moins qu'ils doivent être réalisés avec soin de manière à éviter de provoquer toute microfissure ou toute dégradation, et à faciliter ainsi l'analyse d'images qui constitue l'ultime étape de caractérisation du faciès de fissuration. Le Tableau XX présente une synthèse non exhaustive de méthodes d'imprégnation avec les différentes informations associées.

Tableau 3: Synthèse des méthodes d'imprégnation et principales caractéristiques (ν : viscosité, E : module d'élasticité, R : Résistance en compression, D : Densité)

Référence	Méthode d'imprégnation	Produit		Ouverture minimale de fissure ou précision	Remarques
		Type	Propriétés		
(Borosnyoi-Crawley, 2025)	Injection en manuel via des injecteurs plastiques sous faible pression,	Résine époxy (MC-DUR 1264 KF®)	$\nu=95$ mPa.s $R=85$ MPa	28 μm jusqu'à 10 μm	Durant le chargement mécanique
(Naotunna et al, 2021)	Injection en manuel via des injecteurs plastiques sous faible pression	Résine époxy (Mapepoxy BI IMP), bi-composants (European concrete repair standard EN 1504-5)	$\nu=110$ mPa.s $R=65$ MPa	Précision de 1 μm du microscope digital	Durant le chargement mécanique
(Nemati et al, 1998)	Séchage préalable à 43°C avant l'essai pour désaturer le béton, injection d'un métal fluide possible pendant l'essai	Métal de Wood solide à température ambiante et liquide entre 70 et 88°C	$E=9.7$ GPa $D=9.4$	Non indiqué, mais images MEB fournies	Risque de fissures dues au retrait lors du séchage avant essai mécanique

(Gran, 1995)	Immersion dans un colorant pendant plusieurs jours pour remplacer l'eau porale, application d'une résine époxy pour éviter l'évaporation	Colorant fluorescent dissout à un taux massique de 1% dans un solvant organique (éthanol)		Jusqu'à 1 μm	Imprégnation avant essai
Ammouche et al, 2000) (Hornain et al, 1996)	Immersion de disques de faible épaisseur sciés à partir d'échantillons plus gros, de type carotte	Une eau avec poudre rouge (« Irgacete ») pénétrant plus facilement que colorant fluorescent		Jusqu'à quelques μm	Imprégnation sur échantillons non chargés
(Alterman et al, 2011) (Litorowicz, 2006)	Séchage pour désaturer les pores et fissure, puis mise sous vide pour injection par dépression	Mélange de 2 résines époxy (EpoFix Struers) et d'un colorant fluorescent (EpoDye)		Non indiqué. Résolution du MEB minimale de 10 μm	Imprégnation après essais mécaniques ou dégradations. Risque de fissures dues au retrait lors du pré séchage et après découpe à 35°C avant observation

D'après ces études, les techniques d'imprégnation qui s'affranchissent d'un séchage préalable et permettent une imprégnation sous chargement mécanique utilisent des résines qui se caractérisent à l'état fluide, par une faible viscosité pour combler le réseau de fissures jusqu'à de très faibles ouvertures, et, à l'état durci, par une haute résistance selon (Naotunna et al, 2021) et vraisemblablement un module d'élasticité qui l'est également pour limiter la refermeture des fissures au déchargement.

Lorsque l'imprégnation ne peut être appliquée pendant l'essai mécanique, l'effet de la sollicitation mécanique est évalué par comparaison des faciès avec ceux observés sur échantillons non chargés correspondant à l'état de référence.

Suite à l'essai et à l'étape de sciage et de préparation de l'état de surface des échantillons, différents équipements d'observation peuvent être utilisés pour cartographier le faciès de fissuration dans l'épaisseur du béton. Les principaux sont :

- le microscope digital (avec un agrandissement de 0,01mm (Borosnyoi-Crawley, 2025) ou optique (Litorowicz, 2006)
- le Microscope Electronique à Balayage, MEB (Nemati et al., 1998)

Ces images sont ensuite analysées afin d'identifier le réseau de fissures et de le caractériser, tortuosité et ouvertures. Cette dernière étape peut être facilitée par l'imprégnation de résine fluorescente avec une observation sous lumière à ultraviolet. Néanmoins, elle requiert des procédures basées sur des algorithmes pour réaliser la « segmentation », à savoir mettre en évidence les microfissures du reste de la matière et également de la porosité (Ammouche et al, 2000). En outre, des méthodes stéréologiques peuvent être utilisées afin de caractériser en 3D le réseau de fissure à partir de nombreuses images 2D et de l'application d'approche statistico-géométrique (Ammouche et al, 2000). Des valeurs de paramètres tels que la surface de fissure par unité de volume peuvent ainsi être évaluées.

1.3.2.2 La tomographie aux rayons X

La tomographie ou microtomographie aux rayons X (notée μCT) est une méthode non destructive consistant à acquérir une série de radiographies d'un objet sous différents angles. Un faisceau de rayons X traverse l'objet et est capté par un détecteur, générant des images en 2D appelées projections. Un algorithme de reconstruction transforme ensuite ces projections en une image 3D de

la structure interne, sous forme de coupes transversales (slices). Chaque voxel (pixel 3D) est caractérisé par son coefficient d'atténuation des rayons X, reflétant la densité et la composition du matériau. Cette technique permet de visualiser en détail l'intérieur d'un objet sans le détruire. Elle est appliquée depuis quelques années dans le domaine des matériaux de construction. La tomographie par rayons X est bien adaptée à la caractérisation notamment en termes de répartition de microfissures quelle qu'en soit l'origine. Néanmoins, il peut y avoir des artefacts liés à cette technique. Dans le cas du béton armé, un gradient prononcé d'absorption des rayons X lié à des densités très différentes de ces deux matériaux peut rendre la segmentation difficile, la transition entre l'acier et le béton pouvant être progressive avec la formation d'un halo (shadowing) à l'interface.

Les dimensions de la zone du composite à analyser conditionne le choix des paramètres de la tomographie, qui sont eux-mêmes interdépendants : distance entre l'objet et la source, la résolution du scan (taille du voxel), zone d'émission du faisceau de rayons X, la tension et le courant du faisceau. Pour limiter les artefacts et obtenir une image la plus nette possible, un filtrage du faisceau de rayons X par une feuille d'étain permet d'atténuer le flux de photons de faible énergie. En outre, d'autres paramètres secondaires d'acquisition permettent également d'augmenter les contrastes.

Dans l'étude de (Bernachy-Barbe et al, 2020) qui investiguaient la corrosion des armatures et donc l'interface acier-béton avec la formation des produits expansifs de corrosion, les zones scannées avaient un volume de 22 x 22 x 32 mm et 44 x 44 x 64 mm respectivement pour des prismes 4 x 4 x 16 mm et 7 x 7 x 28 cm. Hess a quant à lui étudié des prismes de 10 x 7 x 50 cm avec une armature HA de 6 mm de diamètre et un enrobage de 2 cm. Avec les dimensions de l'échantillon, la résolution de la microtomographie X correspond à des voxels de 68 μm de côté ce qui permet détecter des fissures inférieures à 0.02 mm. Une illustration d'image de tomographie X est fournie dans la Figure 3.



Figure 3: Evolution temporelle du volume d'acier dissout par corrosion en surface d'un acier HA6 (vue depuis l'intérieur de l'acier) au niveau d'une fissure régulièrement alimentée en chlorures - Images obtenues par traitement de scan $\mu\text{CT-X}$ effectués à différentes échéances sur un échantillon en mortier de section 4cm x 4cm – Taille des Voxels $\sim 20 \mu\text{m}$ – Images Takwa Sayari - CEA

1.3.2.3 Radiographie neutron

La radiographie neutron est une méthode assez similaire à la tomographie aux rayons X. L'échantillon à analyser est exposé à un flux de neutron afin d'obtenir une image en 3D. L'image neutronique est une image 2D d'une couche de l'objet. La radiographie neutronique fournit une structure 3D basée sur une procédure de reconstruction des images appelées projections parallèles. Elle présente un avantage certain en raison de l'excellent contraste fluide-matrice qui résulte de sa grande sensibilité à l'hydrogène, alors que la tomographie aux rayons X est moins précise en raison d'un faible rapport signal/bruit. Cette différence provient des interactions entre les neutrons et la matière, qui sont sensibles à la configuration nucléaire plutôt qu'aux couches électroniques, comme c'est le cas avec les rayons X (Zhang et al, 2018).

L'atténuation des neutrons n'étant pas lié au numéro atomique, l'observation des fissures requiert dès lors une imprégnation préalable avec une solution de nitrate de gadolinium puisque ce dernier se caractérise par une forte capacité d'atténuation des neutrons. Un des inconvénients de cette technique est qu'un séchage susceptible d'engendrer des fissures de retrait gêné doit être appliqué avant cette imprégnation (Najjar et al, 1986). Des utilisations ultérieures ont permis d'améliorer la

visualisation des fissures jusqu'à des ouvertures inférieures à 1 μm (Pugliesi et al., 1997). En outre, cette technique permet de visualiser des processus de pénétration d'eau tels que dans celles de mortier armé (Zhang et al, 2010). Les défauts d'homogénéité du béton peuvent également être détectés, comme les décohésions à l'interface armature et béton en face inférieure par rapport au sens de coulage (Cheng et al, 2003). Cette technique est ainsi plus adaptée que la tomographie aux rayons X qui procure des artefacts métalliques (des stries) et des halos au niveau des contours du fait du contraste entre la densité du béton et celle de l'acier dans le cas des échantillons armés. Enfin, la radiographie neutron est également adaptée aux études portant sur le phénomène d'auto-cicatrisation avec des capsules incluses dans la matrice de divers agents de cicatrisation (Van Tittelboom et al., 2013 ; Van den Heede et al., 2016).

Toutefois, ces dispositifs de mesure sont relativement peu nombreux en France (CEA Saclay, ASNR Cadarache, Institut Laue-Langevin Grenoble) et rendent son usage parcimonieux.

1.3.2.4 Autres techniques

(Mac et al, 2021) listent d'autres techniques d'imageries 3D :

- nanotomographie par faisceau d'ions focalisé (FIB-nt),
- la tomographie par sections sérielles à faisceau d'ions large (BIB-SST),
- la microscopie confocale à balayage laser (LSCM) combinée à des sections sérielles.

Ils proposent ainsi un graphe de synthèse reliant résolution et taille de l'image à partir d'études utilisant ces diverses méthodes. Il en résulte que la microtomographie aux rayons X (μCT) est quasiment la seule parmi celles-ci qui permette d'étudier des échantillons pour des dimensions supérieures à 1 mm, et jusqu'à 100 mm, avec une résolution comprise entre 5 μm et 100 μm , suivant une relation proche de la linéarité.

1.3.3 Essais de corrosion et suivi électrochimique

1.3.3.1 Evaluation à partir du suivi de l'épaisseur des produits de corrosion

L'évaluation d'une activité de corrosion par des méthodes électrochimiques est confortable, puisqu'elle permet de suivre l'évolution de celle-ci tout au long de l'essai, de façon non destructive :

- Evaluation surfacique des gradients de potentiel électrochimique, résultant du couplage galvanique entre site actif et site passif
- Mesure d'un courant de macro-pile, circulant entre deux tronçons consécutifs d'une armature segmentée.
- Calcul d'une densité de courant à travers l'évaluation de l'état de polarisation d'un acier (LPR).

Cependant ces méthodes sont entachées de nombreuses approximations.

La mesure de potentiel électrochimique s'avère délicate pour caractériser finement la propagation de la corrosion. L'atténuation des contrastes par le béton d'enrobage nécessite une zone anodique de taille significative, au regard de l'épaisseur d'enrobage, pour rendre sa détection possible.

Lorsque la densité de courant est calculée à partir de l'évaluation de la résistance linéaire de polarisation (LPR), Angst et Buchler, (2015) rappellent que :

- La réponse du système diffère selon le sens de la polarisation (anodique ou cathodique).
- L'équation de Stern – Geary suppose un état de corrosion uniforme.

De plus, François et al. (2018) rappellent également que la communauté scientifique s'accorde sur le fait que cette technique n'est pas maîtrisée.

1.3.3.2 Mesure sur coupons métalliques d'une partie de l'activité cathodique

Dans (Zhang et al., 2020), Zhang et al proposent de mesurer sur coupons métalliques, répartis dans le volume de béton, une partie du courant cathodique de macro-pile, selon le protocole issu de la norme ASTM G71 (ASTM, 2014).

Cette méthode mise en place dans les travaux de Hess (2024), comme illustré dans la Figure 4, a permis la détection instantanée d'un courant de macro-pile circulant de l'armature tendue (siège de l'activité anodique) vers les coupons métalliques (demeurant passifs tout au long de l'étude), pour une formule de béton présentant une résistivité importante ($\sim 1000 \Omega.m$) pourtant de nature à exercer un contrôle ohmique de l'activité de corrosion (macro-pile).

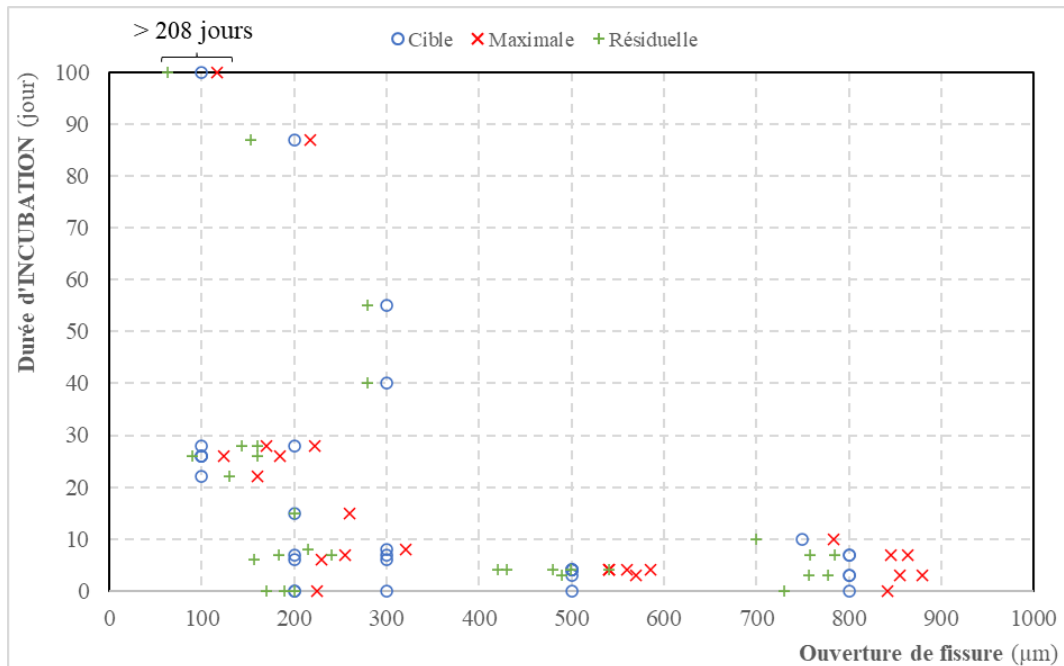


Figure 4 : Durée d'INCUBATION selon l'ouverture de fissure (macroscopique et mesurée en surface du béton) considérée (cible ; maximale ou résiduelle) (Hess, 2024)

1.3.3.3 Evaluation à partir du suivi des pertes de masse

Face aux incertitudes liées aux mesures électrochimiques, certains chercheurs ont fait le choix d'évaluer les cinétiques de corrosion par technique non destructive, en auscultant les aciers de spécimens fendus à différentes échéances d'un essai de corrosion. L'évaluation par gravimétrie des pertes de masse des tronçons présentant des signes de corrosion permet de rendre compte de l'avancement et des cinétiques de l'activité de corrosion (François et Arliguie, 1999), (Zhang et al., 2020), (Yu et al., 2015).

1.3.3.4 Evaluation des pertes de masse selon l'ouverture des fissures de corrosion

Sur des périodes plus longues, François et al proposent d'évaluer les pertes de section locale à partir de la mesure en surface de l'ouverture des fissures de corrosion, selon les méthodes proposées dans (Vidal et al., 2004), (Khan et al., 2014), (Zhang et al., 2010). Ces méthodes proposent de quantifier l'activité de corrosion en fond de fissure en fonction de l'évolution temporelle de l'ouverture des fissures de corrosion mesurable en surface.

1.3.3.5 Evaluation par tomographie de rayons X

La tomographie de rayons X offre une méthode non destructive permettant d'évaluer qualitativement et quantitativement l'activité de corrosion de façon très fine, à travers respectivement l'identification des zones de dissolution du fer et de formation des produits de corrosion, et la mesure par segmentation d'une perte de masse d'acier.

Toutefois, il faut garder à l'esprit que la résolution associée aux volumes 3D, résultant des scans tomographiques de rayons X, est directement liée à la dimension de la zone d'intérêt étudiée et impose donc de travailler sur des spécimens (ou sur des zones d'intérêt) de dimensions réduites (section < 10x10 cm).

Enfin les scans tomographiques ne sont pas dépourvus d'artefacts liés à la technique (ring effect) ou à la présence de deux matériaux (acier et béton) aux densités significativement différentes (shadowing à l'interface acier-béton).

Bernachy-Barbe et al. (2020) proposent d'évaluer entre deux échéances, l'activité de corrosion, à partir de la soustraction du scan courant avec le scan initial.

1.3.4 Besoins d'innovation méthodologique

La synthèse sur les essais expérimentaux révèle un besoin d'innovation technologique dicté par la nécessité de dépasser les observations de surface afin de comprendre les phénomènes se produisant au-delà de l'enrobage, en particulier à l'interface acier-béton (SCI). Les règles de dimensionnement actuelles et la majorité des essais se concentrent sur l'ouverture des fissures en surface, tandis que les observations scientifiques indiquent que la durabilité et le développement de la corrosion dépendent davantage de l'état de l'interface acier-béton que de la largeur de la fissure visible en surface. Le défi technologique réside donc dans la capacité à **créer, figer, et caractériser finement la fissuration et l'endommagement mécanique** qui se produit à cette interface qui conditionnent la phase d'induction de la corrosion.

La conservation de l'état de fissuration sous charge est également un enjeu majeur. En laboratoire, il est souvent difficile de maintenir un chargement mécanique sur le long terme difficilement compatible, qui plus est, avec les essais de corrosion. L'utilisation de cales en PEEK permettent de maintenir l'ouverture de fissure de manière stable sans dispositif de chargement externe encombrant, tout en étant transparentes aux rayons X et insensibles à la corrosion.

Pour pallier la difficulté d'une observation non destructive en profondeur, plusieurs axes d'innovation émergent, chacun avec des limites :

- Tomographie aux rayons X (μ CT) : bien qu'elle permette une visualisation 3D, elle souffre d'artefacts (effets de halo ou "shadowing") dus à la différence de densité extrême entre l'acier et le béton, ce qui rend la segmentation de l'interface difficile. De plus, elle impose de travailler sur des échantillons de petite taille pour conserver une résolution acceptable.

- Radiographie neutronique : cette technique offre un meilleur contraste pour l'interface acier-béton et permet de détecter des décohésions invisibles aux rayons X. Cependant, elle nécessite des infrastructures lourdes et rares, ainsi que des protocoles d'imprégnation complexes.

- Imprégnation et analyse d'image : l'attention porte principalement sur le protocole d'imprégnation et l'utilisation de résines à très faible viscosité pour combler les fissures sans en perturber les ramifications. Il convient toutefois de garder à l'esprit que les outils d'analyse d'images, de l'acquisition aux algorithmes d'exploitation, représentent des besoins fondamentaux, voire des leviers d'innovation. **L'attention sera particulièrement mise sur cette technique** qui permet, à l'heure actuelle, d'obtenir le meilleur rendement d'observation à une échelle compatible avec les phénomènes attendus (initiation, propagation, induction de la corrosion, colmatage des fissures...). Les outils précédents, notamment la tomographie au rayons X, constitueront des outils ponctuels de validation de cette technique.

Les méthodes électrochimiques classiques (LPR, potentiel) sont entachées d'approximations et de difficultés d'interprétation dues à l'effet de filtre du béton d'enrobage. L'enjeu porte sur la fiabilisation du suivi de corrosion en s'orientant vers :

- Le suivi par segmentation d'images 3D pour mesurer directement les pertes de masse d'acier de façon non destructive.

- L'intégration de coupons métalliques dans le volume de béton pour détecter les courants de macro-pile. La combinaison avec la technique précédente permettra de clarifier les processus de micro-pile et de macro-pile et leurs proportions dans les mécanismes de corrosion.

En résumé, l'innovation méthodologique doit permettre de passer d'une approche macroscopique et surfacique à une analyse mésoscopique et volumique, afin de mieux corrélérer l'endommagement physique du béton à l'interface acier-béton avec les cinétiques de corrosion.

1.4 État de l'art opérationnel

1.4.1 Introduction

Cette section présente une analyse des pratiques opérationnelles actuelles concernant le diagnostic, le suivi, et la réparation de pathologies liées à de la corrosion dans les ouvrages en béton armé. Elle s'appuie sur les méthodes d'essais couramment mises en œuvre, sur les observations réalisées sur ouvrages existants et sur les retours d'expérience de différents intervenants.

IMPORTANT : Cette analyse est faite à travers le prisme des objectifs du **PN CraCoDub**.

Nous allons donc analyser les pratiques habituelles en nous focalisant sur la question de savoir si elles permettent de constater et de documenter un éventuel effet de l'ouverture des fissures (ou d'une fissure) d'origine mécanique (*), sous chargement quasi permanent, sur la corrosion et, *in fine*, sur la durabilité des armatures intersectées par ces (cette) fissure(s).

En aucun cas ce chapitre n'a pour objet de porter un quelconque jugement sur la pertinence des pratiques de surveillance et de diagnostic des ouvrages.

(*) rappelons que l'on ne s'intéresse qu'à des situations où la corrosion est initiée par l'ouverture d'une fissure et aux conséquences de cette corrosion et que nous ne nous intéressons pas aux situations où c'est la fissure qui est initiée par la corrosion des armatures.

L'apparition de fissuration d'origine mécanique correspond à un fonctionnement normal de structures en béton armé. Les cas où ces fissures constituent la cause principale et directement identifiable d'une détérioration de la structure par corrosion sont rarement documentés dans la littérature technique comme dans les retours d'expérience ; les pathologies de corrosion observées sont souvent généralisées, les désordres affectant des zones plus ou moins étendues, par exemple au droit de zones où les armatures sont sous-enrobées et/ou le béton présente des défauts de compacité. Ces zones ne sont pas, ou rarement, spécifiquement localisées au droit de fissures d'origine mécanique.

L'objectif de cette section est d'identifier les connaissances disponibles, les limites des approches actuelles, et les besoins non couverts relatifs à l'évaluation du risque de corrosion en présence de fissures mécaniques.

1.4.2 Programme d'essai et retour d'expérience sur ouvrages existants

1.4.2.1 L'examen des parements et le relevé des désordres

Le suivi de l'état de santé des structures ou éléments de structure en béton armé consistepose le plus généralement ensur des inspections détaillées périodiques (typiquement tous les 6 ou 9 ans selon le type d'ouvrage et les résultats des visites d'évaluation triennales). Ces inspections consistent principalement en un examen visuel des parements, un relevé des désordres constatés, notamment les nids de cailloux, le faïençage, les éclatements, les traces de rouilles, ainsi qu'une cartographie des fissures significatives : position, longueur et ouverture. Pour des ouvrages d'importance, ces inspections sont de plus en plus souvent complétées par une instrumentation destinée soit à évaluer finement l'évolution de l'état de l'ouvrage (instrumentation « préventive »), soit à caractériser l'évolution de défauts existants dont l'origine et la gravité n'ont pu être déterminés avec certitude par les inspections détaillées périodiques.

La plupart du temps, la comparaison des résultats d'inspections détaillées successives permet d'évaluer l'évolution de ces désordres dans le temps.

Lorsqu'une évolution anormale est détectée, et/ou une pathologie suspectée, la fréquence des inspections peut être augmentée, une instrumentation peut être mise en œuvre pour suivre plus finement certains phénomènes et des investigations plus approfondies comme un diagnostic « matériaux » ou un recalcul peuvent être réalisées afin de déterminer les causes et la gravité de ces évolutions.

1.4.2.2 Méthodes de diagnostic actuellement utilisées

Une phase de diagnostic est généralement déclenchée lorsqu'une anomalie est suspectée ou identifiée lors de l'inspection visuelle, première étape du suivi des ouvrages.

Cette seconde étape vise à confirmer ou infirmer la présence d'un risque, à caractériser l'état de la structure, des matériaux (béton et armatures) et à déterminer la cause de la pathologie.

Afin d'orienter les investigations, on va s'intéresser aux faciès des fissures et à leurs ouvertures, aux déformations de l'ouvrage, aux paramètres physico-chimiques du béton, à la profondeur de pénétration des agents agressifs à travers l'enrobage et à la recherche de corrosion (cartographies de potentiel et de gradient de potentiel de vitesse de corrosion)). Ceci afin de déterminer si l'on a plutôt affaire à une pathologie essentiellement d'origine mécanique (insuffisance mécanique, tassements, abrasion, choc...), à une pathologie essentiellement liée au matériau béton (réaction de gonflement interne, gel, attaque chimique) ou à une pathologie essentiellement liée à la corrosion des armatures.

En présence d'une pathologie liée à de la corrosion, les diagnostics réalisés sur structures existantes reposent principalement sur des investigations visant à caractériser l'état du matériau cimentaire et des armatures. Les méthodes d'analyse mobilisées pour ces investigations dépendent de la classe d'exposition de l'ouvrage. Les méthodes les plus employées incluent :

- Contrôle des épaisseurs d'enrobage
- Profils des ions chlorure, totaux et libres, pour quantifier leurs profondeurs de pénétration entre la peau du béton et le premier lit d'armatures.
- Mesure de la profondeur de carbonatation par indicateur colorimétrique (bleu de thymol).
- Mesure des potentiels de corrosion (corrosimétrie) pour estimer les probabilités de corrosion des armatures.
- Mesures de résistivité électrique du béton, in situ ou sur carottes, utilisées comme indicateur indirect de la cinétique de corrosion. Ces mesures sont souvent réalisées simultanément aux mesures de potentiel de corrosion.
- Estimation de la vitesse de corrosion par la méthode de polarisation linéaire.
- Analyses chimiques et minéralogiques ponctuelles (dosage ciment, TGA, DRX) pour déterminer la composition du béton.
- MEB et essai d'expansion résiduelle dans le cas de suspicion de réactions de gonflement interne (RAG / RSI).

Dans la pratique, ces investigations sont réalisées sur des zones « courantes » (*), endommagées et non endommagées, mais rarement au droit des fissures, ceci afin d'évaluer l'état général du béton et de la pénétration des agents agressifs dans l'enrobage. Ainsi que l'extension et l'activité des zones qui corrodent. Pour ces investigations, les carottages réalisés au droit de fissures sont exceptionnels, car ils imposent le plus souvent de carotter à proximité immédiate des armatures, ce qui comporte un risque d'endommagement et est rarement justifié en phase de diagnostic opérationnel. Les carottages réalisés au droit de fissure en vue de couper une armature pour l'examiner sont encore plus exceptionnels car cela endommage l'ouvrage et, si de tels carottages existent parfois, ils sont en général accidentels et obligent le plus souvent à réparer les armatures sectionnées. Des lumières peuvent aussi être réalisées pour visualiser l'état des armatures afin de vérifier si les résultats des mesures de corrosimétrie (mesures non destructives) correspondent bien à une corrosion réelle, toutefois ces lumières ne sont pas systématiquement réalisées au droit de fissures.

(*) **Zone courante : zone non située au droit d'une fissure**

Ainsi, en pratique, il n'y a pas de d'examen ou de diagnostic systématique de ce qui se passe à l'intersection entre les fissures et les armatures, ce qui, dans le cadre des questionnements de CraCoDub, est identifié comme une limite des pratiques actuelles.

Cette approche, principalement orientée vers les zones situées en dehors du voisinage immédiat des fissures, limite la production de données susceptibles d'alimenter une compréhension générale des phénomènes pilotant l'évolution de la corrosion localisée en fond de fissure.

De plus, en phase de construction, si des fissures trop ouvertes apparaissent notamment au jeune âge du fait de problème lié à un retrait hydrique et thermique gêné, leur traitement immédiat est le plus souvent exigé par le maître d'ouvrage. La pratique courante consiste à traiter ces fissures par injection ou colmatage. Ce traitement, le plus souvent efficace, ne permet pas d'observer l'évolution naturelle de telles fissures. C'est une bonne chose pour les structures, toutefois cela contribue probablement au faible nombre, pour ne pas dire à l'absence, de cas documentés où la fissuration constitue, à elle seule, la cause primaire de la détérioration de l'ouvrage par corrosion.

1.4.3 Constatations sur les ouvrages existants : effet du retrait gêné

Sur des ouvrages normalement dimensionnés, des fissures excédants parfois largement les ouvertures de fissure « de calcul » peuvent apparaître notamment au jeune âge. De telles fissures fréquentes dans les pièces massives proviennent de déformations gênées dues au gradient de déformations entre le cœur et la surface, elles-mêmes induites par les effets conjugués du retrait endogène, du retrait de dessiccation en surface, et du retrait thermique.

Cela concerne plus particulièrement les pièces épaisses qui sont le siège de développement de températures élevées à cœur du fait du dégagement de chaleur lié à l'hydratation du ciment. Ces pièces durcissent dans un état chaud puis se contractent lors de leur refroidissement (Figure 5). Si la pièce est bridée, soit sur un bord, tel un voile par sa semelle ou une dalle par ses voiles périphériques (Edge Restrain), soit à ses extrémités (End Restrain), des fissures parfois localement très ouvertes peuvent apparaître.

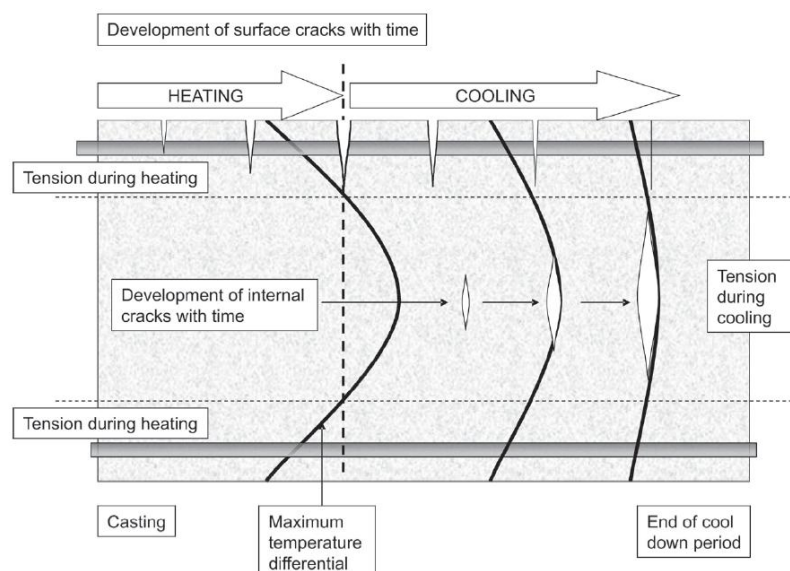


Figure 5 : Processus schématique de fissuration dû au gradient thermique dans une pièce massive - (extrait du CIRIA report C766 (UK))

Pour ce genre de pièce, les fissures apparaissent souvent relativement rapidement, c'est-à-dire dans les jours qui suivent le coulage. Elles sont dans ce cas quasi-systématiquement traversantes puisqu'elles naissent au cœur de la pièce et se propagent vers la peau du béton. Pour d'autres cas, dans lesquels par exemple, le retrait thermique s'avère à lui seul insuffisant pour générer la fissuration,

effet secondaire d'augmenter la fragilité du matériau et de le rendre plus sensible vis-à-vis des effets du retrait thermique et/ou hydrique.

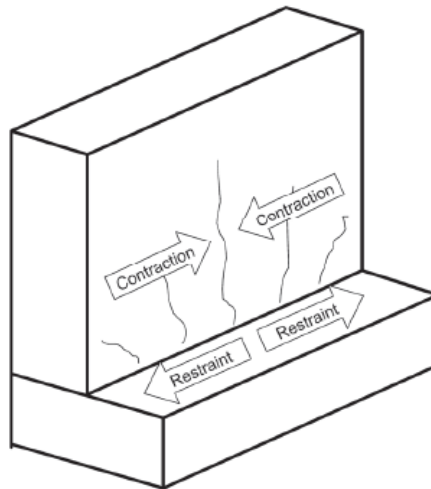


Figure 7 : Motif de fissuration standard d'une pièce en « Edge restrain » (extrait du CIRIA report C766 (UK))

Il paraît donc important d'être en mesure de déterminer si et quand ces fissures de retrait, dont les ouvertures excèdent parfois largement les valeurs maximales de calcul, constituent ou non un problème vis-à-vis de la durabilité de l'ouvrage. En effet, elles apparaissent comme difficilement maîtrisables. Elles sont souvent orientées perpendiculairement aux armatures secondaires et sont donc peu sujettes à s'ouvrir davantage lors du fonctionnement normal de la pièce.



Figure 8 : Exemple de fissures (surlignées en bleu) sur le déflecteur d'un mur chasse-mer – le pointillé représente la reprise de bétonnage entre la partie courante du voile et le déflecteur. Le retrait thermique du déflecteur après prise est gêné par le mur déjà coulé. Les fissures démarrent au niveau de la reprise de bétonnage et se localisent préférentiellement sur les trous de tiges, siège de concentration locale de contraintes.

1.4.4 Retours d'expérience des gestionnaires d'ouvrages d'art (ponts, tunnels, ports)

En discutant avec les spécialistes du diagnostic de corrosion d'ouvrage ou d'expert judiciaire, il semblerait que (perception subjective) :

- Pour ce qui est de la carbonatation : à chaque fois qu'ils ont rencontrés un problème de corrosion, celui-ci était lié à un problème de qualité du béton d'enrobage et/ou de profondeur d'enrobage et donc à la pénétration du dioxyde de carbone et l'avancement du front de carbonatation plus rapides à travers l'enrobage. Aucun ne se souvient d'être intervenu sur un ouvrage pour lequel le béton d'enrobage était de bonne qualité et pour lequel l'origine du désordre serait une fissuration excessive.

- Pour ce qui est des chlorures, les conclusions sont similaires mais beaucoup moins nettes. Si les experts interrogés n'ont pas d'exemple de cas où un gestionnaire d'ouvrage a sollicité leur expertise pour des pathologies liées à de la corrosion localisée au voisinage de fissures, cela est peut-être dû à un biais. En effet, en présence de chlorures, les maitres d'ouvrage sont très attentifs aux fissures et veillent à leur injection dès que celles-ci deviennent importantes.

Pour ce qui est du gel/dégel et sels de déverglaçage, les cas étant moins fréquents, il est aussi difficile d'être affirmatif.

1.4.5 Pratiques actuelles des entreprises de construction et de réparation

Pour réparer un ouvrage dont l'enrobage est sain mais qui présente des fissures considérées comme « trop » ouvertes (par exemple des fissures apparues au jeune âge), les entreprises de réparation interviennent majoritairement par injection de ces fissures, en particulier lorsque leur ouverture excède 0,3 mm/0,4 mm. Dans ces cas, l'objectif est de reconstituer la continuité de la matrice cimentaire et de limiter durablement la pénétration des agents agressifs.

Pour les fissures moins ouvertes, les pratiques courantes de réparation peuvent utiliser une injection avec des résines fluides. Si la fissure est réputée mécaniquement non active, alors on peut avantageusement privilégier le colmatage de la fissure en surface en découpant une saignée en V et en la remplissant avec un mortier sans retrait formulé pour présenter de bonnes caractéristiques d'adhérence sur le béton ancien. Si la fissure est active, il pourra être mis en œuvre un V plus large avec un fond de joint, et on pourra également renforcer localement la réparation en pontant la fissure par l'application sur la fissure d'un tissu en fibre de verre ou de carbone collé à la résine.

Pour réparer des ouvrages dont le béton d'enrobage est contaminé jusqu'aux armatures voire au-delà, d'autres techniques plus lourdes peuvent être mises en œuvre telles que l'hydrodémolition des parties contaminées, suivie d'un nettoyage ou remplacement des armatures endommagées par la corrosion et l'application d'un mortier de réparation pour retrouver la géométrie initiale avec ou sans application d'un inhibiteur de corrosion. Les zones avoisinant la réparation peuvent être aussi avantageusement protégées par une protection cathodique par anode sacrificielle (solution passive dont la durée de vie est limitée de 10 à 25 ans selon les cas) ou par courant imposé (solution plus durable nécessitant une alimentation électrique et un monitoring permanent) afin d'éviter l'"Incipient anode effect".

D'autres techniques peuvent aussi consister soit à réalcaliniser la couche d'enrobage, soit à extraire les chlorures de la zone au voisinage des armatures de façon à restaurer la fonction protectrice de celui-ci. Ces techniques sont disponibles mais restent peu répandues. Elles sont généralement réservées à des situations spécifiques (ouvrages marins, environnements fortement agressifs) avec un recul limité sur leur efficacité à long terme.

1.4.6 Cas emblématiques de pathologies de corrosion liées à la fissuration

Jusqu'à maintenant, nous n'avons pas réussi à identifier de cas emblématiques dans lesquels une pathologie de corrosion importante trouverait son origine dans une fissuration excessive du béton.

1.4.7 Limites des approches opérationnelles actuelles

Les pratiques opérationnelles actuelles présentent des limites qui restreignent la compréhension des mécanismes de corrosion initiés en fond de fissure :

- Surveillance reposant essentiellement sur de l'inspection visuelle.

Les stratégies de surveillance reposent principalement sur la détection visuelle lors des visites des défauts de surface et notamment des fissures (localisation, ouverture, évolution). Cette approche, bien que simple et largement répandue, ne permet ni d'évaluer l'activité corrosive sous-jacente, ni de caractériser la cinétique d'initiation en environnement fissuré.

C'est seulement quand des défauts significatifs et d'extension importante sont révélés que l'on procède à des diagnostics mettant en œuvre des moyens d'investigation plus poussés.

Notons que, de plus en plus, notamment pour les ouvrages d'importance, la surveillance est complétée par une instrumentation intégrée dès la construction et par un contrôle périodique de la durabilité des matériaux.

- Concentration des investigations sur les zones courantes (non situées à proximité immédiate des fissures) lors des phases de diagnostic.

La minimisation du coût du diagnostic impose de s'intéresser essentiellement aux zones représentatives de l'état général de l'ouvrage (zones saines et zones endommagée) et moins aux zones très spécifiques. Ainsi, les essais courants (profils de chlorures, carbonatation, résistivité, vitesse de corrosion) ne sont presque jamais réalisés sur ou à proximité immédiate d'une fissure, afin que la mesure puisse être considérée comme représentatives de l'état général de l'ouvrage. Cette focalisation exclut donc, le plus souvent les zones fissurées potentiellement susceptibles d'initier une corrosion localisée. Ainsi, très peu de données permettent d'évaluer :

- La profondeur réelle des fissures,
- La géométrie du fond de fissure,
- La composition physico-chimique locale (pH, produits de colmatage, teneur en chlorures, saturation),
- Ou l'état électrochimique de l'acier adjacent.

Les outils courants (résistivité, potentiel, polarisation linéaire) mesurent des phénomènes relativement globalisés et n'ont pas toujours une résolution spatiale suffisante pour identifier l'origine (pénétration des agents agressifs à travers l'enrobage ou seulement via la fissure).

- Influence du traitement préventif des fissures.

Lorsqu'il y a des fissures d'ouvertures importantes (notamment au jeune âge), la pratique consistant à injecter ou colmater ces fissures avant la fin des travaux empêche souvent d'observer leur évolution naturelle et les mécanismes potentiels de corrosion associés. Cela réduit fortement le retour d'expérience sur l'impact réel des fissures non traitées.

- Peu de monitoring instrumenté en conditions réelles.

Les capteurs noyés ou la mesure en continu des phénomènes de corrosion sont encore peu répandus dans les ouvrages courants, limitant la compréhension des interactions entre fissuration, transport des agents agressifs, et corrosion. Par ailleurs si capteur il y a, encore faut-il qu'il soit positionné au voisinage d'une fissure pour communiquer une information pertinente sur celle-ci.

Les approches actuelles ne sont pas ciblées sur la fissure proprement dite, ni sur son influence sur le développement de la corrosion. Elles laissent largement inexploré le fond de fissure au voisinage de l'acier, qui est pourtant une zone déterminante dans l'initiation et la propagation de la corrosion et donc pour la durée de vie de l'ouvrage.

C'est précisément cette lacune — le manque de données systématiques et scientifiquement interprétables sur la corrosion dans les zones fissurées — que le projet CraCoDub se propose de combler. Notamment dans le cadre de l'axe 2 – Etude In situ.

2 Originalité du Projet National

2.1 Positionnement du projet par rapport aux projets récents

Les objectifs et l'approche du PN **CraCoDub** sont complémentaires mais très différentes de ceux des projets nationaux ou projets ANR antérieurs de ces deux dernières décennies qui traitent des sujets de l'ouverture de fissure et de durabilité des structures en béton armé.

En particulier les Projets Nationaux CEOS.fr (2008-2014) et Perfdub (2015-2019) ont des préoccupations assez proches de celles du PN CraCoDub. Néanmoins l'objet de ces projets s'avère, dans le détail, très différents comme le schématise le croquis ci-dessous (Figure 9).

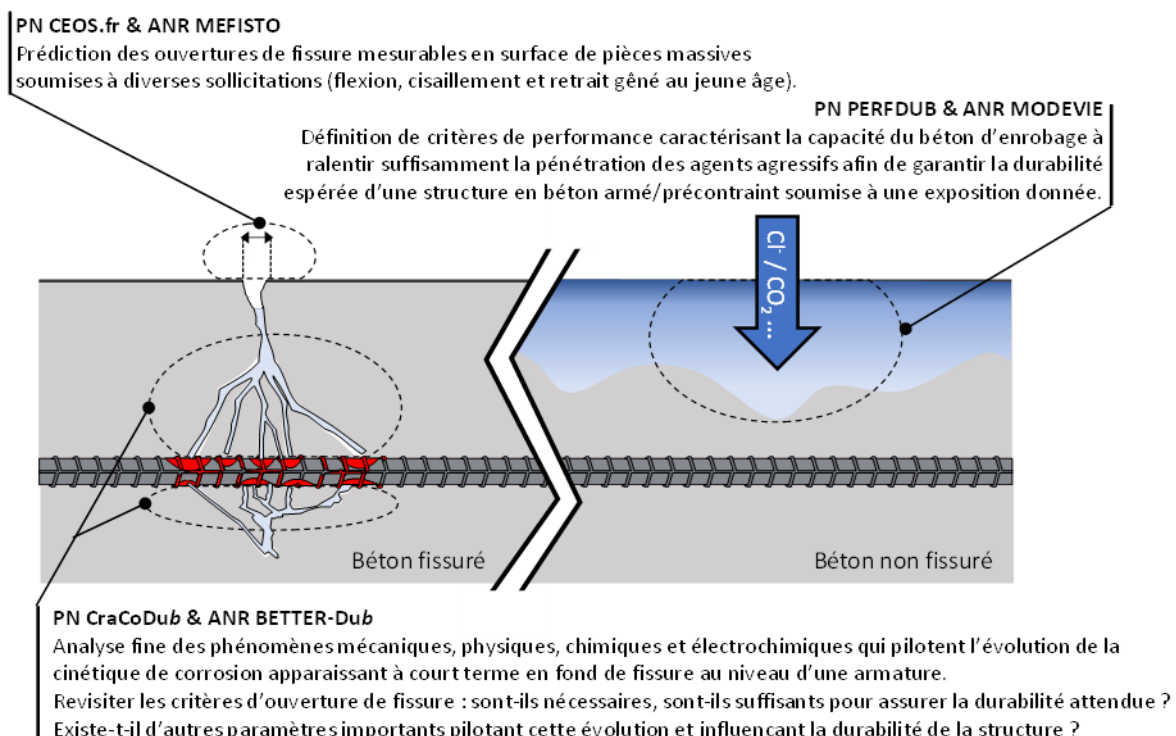


Figure 9 : Zones d'études comparées des Projets Nationaux CEOS.fr, Perfdub et CraCoDub

2.1.1 PN CEOS.fr & ANR MEFISTO

Lancé à l'initiative notamment d'EDF, ce Projet National visait à améliorer de façon significative les pratiques de l'ingénierie pour évaluer les ouvertures de fissures en surface du béton dans les structures en béton armé ou précontraint et plus spécifiquement dans les structures **massives** afin de prédire leur évolution au cours de la vie des ouvrages.

Cette étude, essentiellement mécanique, s'est concentrée sur 3 types d'éprouvette de grandes dimensions :

- ⇒ Les éprouvette THCM (Thermo-Hydro-Chemo-Mécanique)
Il s'agit de tirants de section constante 500 x 800 mm en partie courante et de longueur 5100 mm, équipés à leurs 2 extrémités de chevêtres permettant d'installer 2 tubes métalliques de forte section venant brider les déformations du tirant.
Le béton a été formulé et isolé thermiquement afin de chauffer suffisamment pendant sa prise pour garantir l'apparition d'une ou plusieurs fissures liées à la contraction gênée du béton lors de son refroidissement



- ⇒ Les éprouvette RL pour Retrait Libre : il s'agit de parallélépipède 800 x 1600x 6100 mm sollicitées en flexion simple sous chargement statique monotone.
- ⇒ Les éprouvettes de cisaillement : il s'agit de voiles de dimensions importantes, 4200 x 1050 x 150 mm associés à des poutres en parties supérieure et inférieure et sollicitées en cisaillement cyclique non alterné et croissant.

Le projet ANR MEFISTO (**M**aitrise Durab**I**e de la Fissuration des infra**ST**tructures en bé**TO**n) a été lancé en parallèle du PN CEOS.fr pour améliorer les modélisations existantes de la fissuration en chargement cyclique et chargement THCM.

En conclusion, le PN CEOS.fr et l'ANR associé MEFISTO se sont intéressés à la modélisation et la prédiction de l'ouverture de fissure en surface sous différentes sollicitations. Cependant, ils ne se sont intéressés ni au faciès 3D des fissures en profondeur, ni à la problématique de la corrosion en fond de fissure qui sont les sujets principaux du **PN CraCoDub**.

2.1.2 PN PERFDUB & ANR MODEVIE

Acronyme d'Approche **P**erformantielle de la **D**urabilité des ouvrages en **B**éton, l'objectif principal de ce projet était de définir une méthodologie à l'échelle nationale de justification de la durabilité des bétons et des structures en béton armé ou précontraints par une approche performantielle, incluant la méthode « absolue » et la méthode « comparative ». Il s'agissait d'agréger les connaissances et le retour d'expérience, de combler les manques, dans un cadre réunissant tous les acteurs concernés pour que l'approche performantielle devienne opérationnelle et d'usage courant.

Le projet était organisé en 5 thématiques

- Thème 1 – Essais de durabilité : Corrélation indicateurs / carbonatation, optimisation de certains modes opératoires, essais croisés, étude « ageing effect », ...
- Thème 2 – Définition des seuils de performance admissibles : exploitation de données expérimentales (base de données, corps d'épreuve, ouvrages anciens, ...), utilisation de modèles de vieillissement (synergie avec ANR Modevie)
- Thème 3 – Bétons à étudier : paramètres (liant, granulats, E_{eff}/Leq , ...), tableaux de l'annexe nationale française, variabilité spatiale et temporelle
- Thème 4 – Contractualisation de l'approche : Contexte contractuel, CCTP Type, contrôles de conformité
- Thème 5 – Valorisation des résultats (France et Europe)

Le PN Perfdub s'est donc attelé à définir et caractériser des indicateurs et les essais correspondant permettant de quantifier la capacité du béton d'enrobage à ralentir suffisamment la pénétration des agents agressifs pour que ceux-ci n'aient pas encore atteint les armatures en fin de vie théorique de l'ouvrage.

Le projet **ANR MODEVIE (M**odélisation du **V**eillissement des ouvrages en béton) a été lancé en parallèle au **PN PERFDUB** pour développer un modèle de type Ingénieur pour la prédiction du comportement des ouvrages vis-à-vis de la durabilité et de la corrosion des armatures en intégrant les indicateurs de l'approche performantielle.

- Définir à partir des modèles « utiles au chercheurs », un modèle simple accessible aux ingénieurs en vue de l'application de l'approche performantielle dans un premier temps à des éléments de structures subissant une dégradation par des essais de laboratoire (couplage carbonatation et brouillard salin)
- Appliquer le modèle « ingénieur » pour quantifier le niveau de dégradation des structures vis-à-vis de la corrosion des armatures dans un cadre d'état limite selon le schéma suivant :

ELS « A » : problème purement d'aspect ;
ELS « F » : problème de fonctionnement (déformation excessive) ;
ELU « I » : problème d'intégrité mécanique de la structure.

- Proposer pour chaque EL des indices cibles croissants en fonction de la gravité des conséquences de la corrosion des aciers
- Appliquer l'approche performantielle à des cas réels. Les résultats de ce travail seront également utiles aux maîtres d'ouvrage qui gèrent un parc vieillissant de structures en béton armé.

Le Projet National **PERFDUB** et l'ANR Associé **MODEVIE** ont fait énormément progresser l'approche performantielle en mettant en évidence le lien entre indicateurs de performance et durabilité, en étudiant la variabilité de ces indicateurs de performance au cours de production de béton en grande quantité et sur une longue période et à leur évolution dans le temps (ageing factor), et en fournissant des modèles et des recommandations utilisables par l'ingénieur. Cependant, ces études concernent le comportement du béton **non fissuré**. L'effet d'une fissure sur l'apparition et l'évolution de la corrosion au droit de cette fissure n'a pas été une préoccupation de ces deux études.

2.1.3 Projet DECOF-Ré

Piloté par le CEREMA et l'IFSTTAR (devenu l'UGE, Université Gustave Eiffel), le projet **DECOF-Ré** avait pour objectif de créer une base de données à partir d'un retour d'expérience sur le comportement d'une structure en ambiance marine : les piles du pont de l'île de Ré âgées de 29 ans à l'époque du projet.

11 piles dont 10 en mer et une à terre, ont fait l'objet d'une campagne d'évaluation incluant :

- Des inspections visuelles pour identifier les signes de dégradation
- Des investigations à l'aide du radar pour évaluer les enrobages réels
- Des mesures de résistivité électrique du béton avec une sonde WENNER
- Des mesures de potentiel électrochimique et de cinétique de corrosion
- Par ailleurs, un certain nombre de carottes pour évaluer les propriétés du béton et la pénétration des chlorures et de la carbonatation ont été réalisées.

Les résultats et les conclusions de cette campagne sont mis à la disposition de la communauté scientifique et ont fait l'objet de nombreux articles.

Il apparaît que ce projet n'a que très peu de liens avec les préoccupations du PN CraCoDub, si ce n'est qu'il concerne le comportement d'une structure modérément âgée en milieu marin. Il sera néanmoins intéressant de prendre connaissance de ces données avec le regard « CraCoDub » afin de voir dans quelle mesure, il serait possible d'en tirer des enseignements utiles, notamment pour l'axe 2. Dans l'éventualité où la présence de fissures structurelles d'ouverture significative et dont l'origine ne serait pas attribuable à la corrosion, serait observée, cela constituerait un cas de figure approprié au PN CraCoDub.

2.1.4 ANR APPLLET (Durée de vie des Ouvrages béton : Approche Prédictive Performantielle et probabiliste)

Les objectifs de ce projet ANR étaient de :

- Assurer un transfert des modèles physico-chimiques à l'échelle du matériau vers des modèles de comportement d'éléments de structure.
- Mieux comprendre et appréhender les processus de corrosion (impact sur le comportement des aciers).
- Intégrer les acquis de connaissance sur l'évolution des bétons et des aciers afin de traiter le problème d'interface entre les deux matériaux en cours d'évolution et proposer des modèles numériques pertinents.

- Disposer de modèles prédictifs robustes pour modéliser et prédire le comportement d'éléments de structure dégradés sur le long terme, en prenant en compte des effets des comportements différés.
- Quantifier les différentes sources de variabilité (matériau et structure) et les prendre en compte dans des approches probabilistes.
- Intégrer le retour d'expérience provenant du suivi des ouvrages par des instrumentations adaptées.
- Intégrer les actions préventives de contrôle et de maintenance.

Les objectifs annoncés peuvent apparaître assez similaires à ceux du PN CraCoDub. Toutefois, il y a une différence fondamentale sur laquelle il convient de bien insister :

En effet, loin d'une fissure, le mécanisme de dégradation est schématiquement le suivant :

- 1) Pénétration lente des agents agressifs à travers l'enrobage. Cette phase pendant laquelle il ne se passe rien est normalement très longue si le béton est de qualité et si l'enrobage est suffisant. Elle correspond à une part très importante de la durée de vie prévisionnelle de l'ouvrage.
- 2) La concentration des agents agressifs au contact des armatures commence à atteindre localement puis plus généralement des valeurs suffisantes pour amorcer localement des points de corrosions.
- 3) Les produits de corrosion, plus volumineux que l'acier, génèrent une pression sur le béton d'enrobage qui croît progressivement et l'endommagement plus ou moins rapidement.
- 4) La fissuration puis l'éclatement du béton d'enrobage qui en résulte accélère la pénétration des agents agressifs, favorisant l'extension des zones corrodées et accélère aussi progressivement la cinétique globale de la corrosion conduisant à une durée de vie résiduelle limitée de l'ouvrage en l'absence de réparation majeure.

Ce sont principalement ces phénomènes, leur cinétique et leur variabilité qui sont étudiés et modélisés dans l'ANR APPLET.

A proximité d'une fissure d'origine mécanique qui n'est pas induite par la corrosion, le mécanisme d'évolution est, au moins au début, très différent. En effet,

- 1) Lors de l'apparition d'une fissure d'origine mécanique externe (chargement) ou interne (retrait thermique ou hydrique gêné), les agents agressifs accèdent très rapidement à la partie de l'armature en fond de fissure, ce qui amorce **quasi immédiatement**, et quasiment quelle que soit l'ouverture de la fissure, une corrosion localisée à cet endroit.
- 2) Les produits de corrosion apparaissant à l'intersection fissure-armature disposent d'un volume de vide suffisant pour absorber les variations de volume et ne pas générer de pression significative.
- 3) La fissure peut, ou non se colmater sous l'effet de différents facteurs : le remplissage par les produits de corrosion, l'autocicatrisation liée aux grains de liant non ou incomplètement hydratés, à la carbonatation ou à des dépôts de calcite liée à des eaux entartrantes, la pénétration de particules solides, la formation d'un bio film, le chargement cycliques, la qualité de l'interface,
- 4) Selon les conditions, la corrosion peut ralentir jusqu'à un quasi-arrêt et n'avoir finalement que très peu d'influence sur la durée de vie globale de l'ouvrage.

A contrario, la cinétique de corrosion en fond de fissure peut aussi demeurer significative pendant un temps suffisant pour que l'endommagement local de l'armature devienne problématique et diminue significativement la durée de vie de l'ouvrage

Ce sont ces problématiques auxquelles s'intéresse CraCoDub. Elles diffèrent donc significativement de celles de l'ANR APLET.

Il y a néanmoins un type d'essai qui a été réalisé dans le cadre de l'ANR APLET et qui peut concerner directement les préoccupations de CraCoDub. Il s'agit de tests réalisés par le LMDC (INSA Toulouse) qui consistent à réaliser des anneaux en béton armé sur lequel un noyau expansif permet d'initier mécaniquement des fissures radiales traversantes de dimensions maîtrisées. Ces anneaux sont ensuite exposés à des chlorures (Figure 10). En fin d'essai, la pénétration des chlorures via les lèvres de la fissure dans le sens orthoradial a été mesurée et corrélée à l'ouverture de fissure.

Le retour d'expérience de ces essais participera à la définition des protocoles d'essais qui seront réalisés dans le cadre de l'axe 1 du PN CraCoDub.



Figure 10: Dispositif de l'essai de fissuration par cœur expansif (Cremona et al. 2011)

2.1.5 Conclusions sur le positionnement du Projet CraCoDub

Le PN CraCoDub, vient compléter les différents projets et études collaboratives de ces dernières décennies sur la durabilité des structures en béton armé en investiguant une problématique importante qui n'a pas encore été étudiée.

Il paraît aussi important de préciser que le comité de rédaction de ce présent document inclut de nombreuses personnes ayant participé activement aux Projets Nationaux CEOS.fr et PerfDub ainsi qu'aux ANR MEFISTO, MODEVIE et APLET ou au projet DECOF-Ré.

2.2 Verrous scientifiques et techniques identifiés et objectifs du Projet National

Le PN CraCoDub s'inscrit dans la suite des projets précités en se concentrant sur la fissuration préexistante (mécanique, retrait plastique, thermique, ...) du béton et son rôle dans l'initiation et la cinétique la corrosion des armatures. CraCoDub cherche donc à approfondir ce facteur clé dont la maturité scientifique reste limitée et ne permet pas sa prise en compte dans les modèles de durabilité.

Si les travaux les plus récents indiqués dans l'état de l'art ont apporté un éclairage nouveau sur le faciès des fissures initiales du béton d'enrobage, leurs ramifications et sur la corrosion induite, ces études ont été réalisées dans des conditions particulières (composition du matériau, géométrie des éprouvettes, conditions environnementales). Plusieurs verrous scientifiques restent donc à lever pour définir correctement des ouvertures de fissures en surface associées aux conditions de l'interface acier/béton en fond de fissures, et permettre ainsi d'améliorer la durabilité et d'optimiser les quantités d'acier dans les ouvrages

Les verrous scientifiques et méthodologiques identifiés ci-après s'inscrivent directement dans la problématique plus large de la standardisation des protocoles expérimentaux pour les essais de fissuration et de corrosion. En effet, l'absence de protocoles harmonisés constitue aujourd'hui un frein

à la compréhension des mécanismes de corrosion en fond de fissure, à la comparabilité des résultats et à la validation des solutions préventives et correctives.

A. Caractériser le faciès 3D de fissures préexistantes, depuis la surface jusqu'à l'armature, et identifier les paramètres qui le pilotent

Il s'agit de développer et mettre en œuvre des méthodes permettant de visualiser et caractériser finement la morphologie tridimensionnelle des fissures depuis la surface jusqu'à l'armature, et identifier les paramètres qui la pilotent. L'objectif est d'accéder à une description réaliste de la géométrie complète des fissures, condition essentielle à l'analyse des mécanismes de corrosion, et s'éloigner ainsi du paradigme de l'ouverture mesurée en surface comme seul critère de la durabilité présumée. La caractérisation tridimensionnelle des fissures (largeur, profondeur, ramifications, ...) nécessite des protocoles de mesure clairement définis pour comparer les morphologies de fissures entre différents essais.

B. Créer des défauts maîtrisés et reproductibles à l'interface acier-béton

La création de défauts/dégradations contrôlés constitue un prérequis essentiel afin d'étudier l'influence des caractéristiques morphologiques des fissures sur les mécanismes de corrosion, les cinétiques (induction ou non de la corrosion), mais également la pénétration des agents agressifs dans les fissures. Il convient ainsi d'assurer des conditions de fissuration pour lesquelles les résultats expérimentaux de laboratoire sont obtenus, mais également de tester de manière comparative l'efficacité de solutions préventives et correctives. Des procédures de génération maîtrisée de fissures et de défauts à l'interface acier-béton permettront donc de garantir la répétabilité des essais et de limiter la variabilité expérimentale.

C. Concevoir des dispositifs expérimentaux permettant d'identifier les mécanismes de corrosion prédominants en fond de fissure

La distinction des mécanismes de corrosion en fond de fissure par micropile, macropile ou une combinaison des deux ne peut être tranchée de manière certaine qu'à travers des dispositifs expérimentaux conçus selon des protocoles stricts. Pour les mécanismes de propagation de la corrosion par micropile, les sites anodiques et cathodiques sont géométriquement confondus et la cinétique est alors principalement influencée par l'ouverture de la fissure. Dans le cas d'une macropile, les sites anodiques et cathodiques sont spatialement dissociés ; l'ouverture de la fissure constitue alors un paramètre parmi d'autres influençant la cinétique. L'absence actuelle de consensus sur ces mécanismes rend indispensable une approche expérimentale permettant de trancher clairement, ce qui constitue un enjeu fondamental pour l'évaluation et la modélisation de la durabilité des structures fissurées.

D. Suivre l'évolution et caractériser les processus de corrosion à l'interface armature-fissure dans des corps d'épreuve représentatifs de structures réelles

La mise en place de protocoles expérimentaux de suivi temporel de la corrosion permettra de caractériser les processus associés en fond de fissure dans des corps d'épreuve à l'échelle structurelle. Il s'agit notamment de relier les paramètres environnementaux et géométriques des fissures aux cinétiques de corrosion observées. Le suivi temporel de la corrosion au droit des fissures requiert là encore des méthodologies expérimentales reproductibles, intégrant des conditions environnementales et électrochimiques maîtrisées. Les résultats obtenus sur différents corps d'épreuve permettront de constituer une base de données fiables, nécessaire à l'évaluation des mécanismes de corrosion et à la validation de modèles prédictifs.

E. Identifier des structures existantes pour des études in situ

L'identification de structures réelles pour des études de la fissuration et de la corrosion in situ doit s'appuyer sur des protocoles communs de sélection et de caractérisation des fissures et de la corrosion. Il faut s'assurer de pouvoir distinguer une fissure préexistante et la corrosion qui résulte d'une fissuration issue d'une corrosion par contamination du béton d'enrobage. Ce verrou représente un défi organisationnel nécessitant un portage collectif à l'échelle nationale. La mise en place de

méthodologies partagées de diagnostic constitue une étape indispensable pour assurer la cohérence entre les résultats des essais de laboratoire et ceux expérimentaux à l'échelle des ouvrages.

L'utilisation de techniques avancées de caractérisation, combinant tomographie X, analyses physico-chimiques locales et modélisation par méthode inverse pour extraire des paramètres mécaniques et électrochimiques pertinents sera privilégiée dans le projet. L'approche multi échelle et multiphysique, couplant mécanique, transport, chimie, électrochimie, apparaît incontournable pour modéliser fidèlement les processus de corrosion en fond de fissures.

2.3 Retombées attendues du Projet National

2.3.1 Retombées liées à une meilleure compréhension des mécanismes de corrosion en fond de fissure.

L'analyse approfondie des mécanismes de corrosion en fond de fissure et de leur impact sur la durabilité permettra une meilleure compréhension du comportement réel des ouvrages et de l'impact de la fissuration observée sur la corrosion des armatures.

Ces connaissances contribueront à éclairer les diagnostic et pronostic d'ouvrages existants, et par conséquent d'optimiser leur maintenance.

Les travaux de l'axe 3, combinés à l'axe 4 dédié à la diffusion des connaissances, visent à qualifier et quantifier l'efficacité de solutions techniques préventives et/ou curatives. Cette démarche permettra :

- aux fournisseurs de solutions de fonder la crédibilité de leurs produits sur des résultats partagés par la communauté scientifique nationale ;
- aux ingénieries et aux maîtres d'ouvrage de sélectionner et de prescrire ces solutions de manière plus ciblée et plus efficace.

2.3.2 Retombées liées à une évolution de l'annexe nationale Française vers les valeurs de l'EC2

L'annexe Nationale Française préconise des limitations d'ouvertures de fissure plus restrictives que celles définies dans l'Eurocode 2 (notamment pour les classes d'exposition XS et XD (Tableau). Une des retombées espérées de ce PN serait de démontrer que ces limitations ne sont pas toujours nécessaires.

Ce paragraphe vise à évaluer les retombées d'une telle évolution en s'appuyant sur un cas d'étude représentatif, et notamment les retombées sur la consommation d'armatures.

La consommation annuelle de béton en France est de l'ordre de 70 Mm³ dont environ 25% sont destinés au secteur du bâtiment et environ 75% au secteur du génie civil.

Ces ordres de grandeur permettent d'évaluer, à l'échelle du territoire Français, l'impact potentiel d'un retour de l'annexe Nationale Française aux valeurs recommandées par l'Eurocode 2 pour les classes d'environnement XS et XD. Cette évolution se traduirait par une augmentation de l'ouverture admissible des fissures sous charge quasi permanente, de 0,2 mm à 0,3 mm.

2.3.2.1 Cas représentatif étudié

Hypothèses générales retenues

L'analyse repose sur les hypothèses prudentes suivantes :

- Hypothèse 1 : 20% des ouvrages de génie civil sont des ouvrages structurels situés en classes d'exposition XS ou XD.
- Hypothèse 2 : le ratio moyen d'armatures de ces ouvrages est de l'ordre de [140-150 kg/m³].

- Hypothèse 3 : 60 % de ces ouvrages sont dimensionnés par un critère de limitation de l'ouverture des fissures aux ELS.
- Hypothèse 4 : le cas de calcul présenté ci-après est représentatif de ces ouvrages.

Cas représentatif étudié

On considère une dalle de 40 cm d'épaisseur, réalisée en béton C40/50, avec un enrobage réel de 40 mm, soumise à un moment fléchissant de +/-100 kN.m dans les 2 directions.

- **Ouverture de fissure limitée à $w_k = 0,2$ mm (long terme)**
 - Armatures nécessaires : 1 HA20, espacement $e = 18,8$ cm
 - Section d'acier : $16,7$ cm²/ml
 - Ratio d'armatures équivalent ≈ 144 kg/m³
 - **Ouverture de fissure limitée à $w_k = 0,3$ mm (long terme)**
 - Armatures nécessaires : 1 HA16, espacement $e = 17,0$ cm
 - Section d'acier : $11,9$ cm²/ml
 - Ratio d'armatures équivalent ≈ 110 kg/m³
- ➔ L'augmentation de l'ouverture admissible conduit ainsi à un **gain d'environ 28 % sur le ratio d'armatures** pour un même moment de flexion sollicitant.

2.3.2.2 Retombées environnementales

Sur la base des hypothèses précédentes, le gain annuel potentiel en armatures peut être estimé à : $70\,000\,000 \times 75\% \times 20\% \times 60\% \times 0,150 \times 28\% \approx 260\,000$ t d'armatures/an

En retenant une émission moyenne de **900 kg CO₂ par tonne d'armatures** produites en France, cette réduction permettrait :

- D'éviter l'émission d'environ **240 000 t de CO₂ par an**,
- soit un gain d'environ **38 kg de CO₂ par m³ de béton armé produit**

Ceci pour le seul secteur du génie civil et uniquement pour les classes d'exposition XS et XD.

2.3.2.3 Retombées économiques

Retombées économiques liées aux armatures (acier)

En considérant un coût moyen de fourniture et de mise en œuvre des armatures (transport, découpe, façonnage et pose) de l'ordre de $1,4$ €/kg (coût direct, hors prix de vente), la réduction estimée des quantités d'acier représente :

- ➔ Une économie annuelle comprise entre 300 et 350 millions d'euros.

Ces gains concernent directement la production, la transformation et la mise en œuvre des armatures.

Retombées économiques liées à la mise en œuvre du béton et au processus constructif

L'estimation précédente est volontairement conservatrice, car elle ne prend pas en compte les nombreux coûts indirects induits par des ratios d'armatures élevés.

Pour les ouvrages fortement ferrailés (ratios typiquement supérieurs à **200–250 kg/m³**) rencontrés de plus en plus fréquents notamment en génie civil nucléaire ou pour les parois moulées, l'augmentation du coût global n'est plus proportionnelle à la quantité d'acier. Elle entraîne en effet une cascade de surcoûts non linéaires, parmi lesquels :

- Complexification et allongement des études et des plans d'exécution ;

- Augmentation de la sévérité des tolérances d'exécution ;
- Baisse de productivité lors de la pose des armatures ;
- Difficulté de mise en œuvre du béton et gestion de défauts associés.

Ces coûts collatéraux peuvent, dans certains cas, être très **largement supérieurs au seul coût de fourniture des armatures**. Dans des situations extrêmes, l'augmentation excessive des ratios d'armatures peut même conduire à une **impossibilité constructive**, imposant une refonte complète de la conception ou un changement de solution constructive ou de matériau.

2.3.3 Retombées potentielles liées à une modification des ouvertures autorisées par l'EC2 dans les cas XC2 à XC4

Une relaxation de l'ouverture de fissure de 0,3 mm à 0,4 mm en classes d'exposition XC2 à XC4 apparaît également envisageable. Cet objectif nécessiterait lui aussi une mise à jour de l'annexe nationale et conduirait à adopter une valeur moins restrictive que celle préconisée par le tableau 7.1-N de l'EC2 (cas de l'annexe nationale Danoise par exemple).

Par ailleurs, le gain potentiel sur le ratio d'armature est plus délicat à estimer, car on se situe dans une zone où le dimensionnement à l'ELU peut être le facteur dimensionnant.

Néanmoins, on peut reprendre le même calcul qu'au chapitre précédent en limitant le gain à une valeur « prudente » de 10% et en retenant un pourcentage d'ouvrage en classe XC2 à 4 de l'ordre de 30%.

Les gain potentiel pour la classe XC3/4 est de l'ordre de :

$$70\,000\,000 \times 75\% \times 30\% \times 60\% \times 0,150 \times 10\% \approx 140\,000 \text{ t d'armatures/an}$$

Notons que, dans ces conditions (limitation ouverture à 0,4 mm), il peut s'avérer intéressant, pour restreindre les quantités d'armatures, de recourir à des armatures ayant une résistance mécanique plus élevée. Cela pourrait surtout intéresser le secteur de la préfabrication et du bâtiment.

2.3.4 Autres retombées

Au-delà des gains directs en termes de quantités d'armatures, une évolution des critères de limitation de l'ouverture des fissures soulève également un certain nombre de **retombées techniques majeures**, mais aussi de **défis opérationnels**, qui concernent directement la conception, la mise en œuvre et la gestion du patrimoine existant.

a) Enjeux liés à la mise en œuvre du béton

La réduction des ratios d'armatures induite par une relaxation des critères de fissuration améliore significativement la **constructibilité des ouvrages**. Des structures moins congestionnées en acier présentent en effet :

- une meilleure circulation du béton frais entre les armatures ;
- une réduction des risques de ségrégation et de blocage ;
- une amélioration globale de la qualité de remplissage et de la compacité du béton notamment celui de l'enrobage.

Ces effets sont particulièrement déterminants pour les ouvrages fortement sollicités, les zones d'about, les parois minces ou les ouvrages à géométrie complexe.

b) Consistance du béton et vibration

Les ouvrages très ferrailés imposent souvent le recours à des bétons très fluides, voire autoplaçants, afin de compenser la difficulté de mise en œuvre. Cette contrainte peut générer :

- une sensibilité accrue aux variations de formulation et de consistance ;
- une exigence élevée sur la maîtrise de la rhéologie du béton ;
- une augmentation des risques de défauts (ressuage, ségrégation, nids de gravier).
- une sensibilité plus élevée au risque de fissuration par déformation gênée, notamment due au retrait de séchage (volume de pâte plus important)

Une réduction des taux d'armatures permettrait, à l'inverse, de **revenir à des plages de consistance plus robustes**, de faciliter la vibration lorsque celle-ci est nécessaire, et de **sécuriser la qualité d'exécution**, tout en réduisant la dépendance à des formulations de béton très spécifiques (pointues).

c) Renforcement, réparation et réutilisation des ouvrages existants

Une autre retombée importante concerne les **ouvrages existants**, dimensionnés historiquement avec une ouverture admissible des fissures de **0,2 mm**. Une augmentation de cette valeur admissible pourrait permettre de :

- **Justifier des niveaux de chargement plus élevés**, sans renforcement lourd ;
- Faciliter des opérations d'adaptation telles que des **élargissements**, des surcharges ou des changements d'usage ;
- Limiter les interventions de réparation ou de renforcement structurel, souvent coûteuses et complexes.

Dans une logique de **réutilisation et d'allongement de la durée de vie des ouvrages**, cette évolution peut constituer un levier majeur pour réduire l'empreinte environnementale globale du secteur, en évitant des démolitions prématurées et des reconstructions.

d) Arbitrage entre conservation, adaptation et reconstruction

Enfin, la capacité à mieux justifier les ouvrages fissurés et à mieux comprendre les mécanismes de dégradation associés permettrait d'éclairer les décisions stratégiques des maîtres d'ouvrage entre :

- Démolition et reconstruction ;
- conservation et prolongation de la durée de vie avec renforcement ;
- adaptation de l'ouvrage existant à de nouveaux usages ou à des exigences accrues de résilience.

Dans ce contexte, les résultats du Projet National apportent des **outils objectifs d'aide à la décision**, à la fois techniques, économiques, et environnementaux.

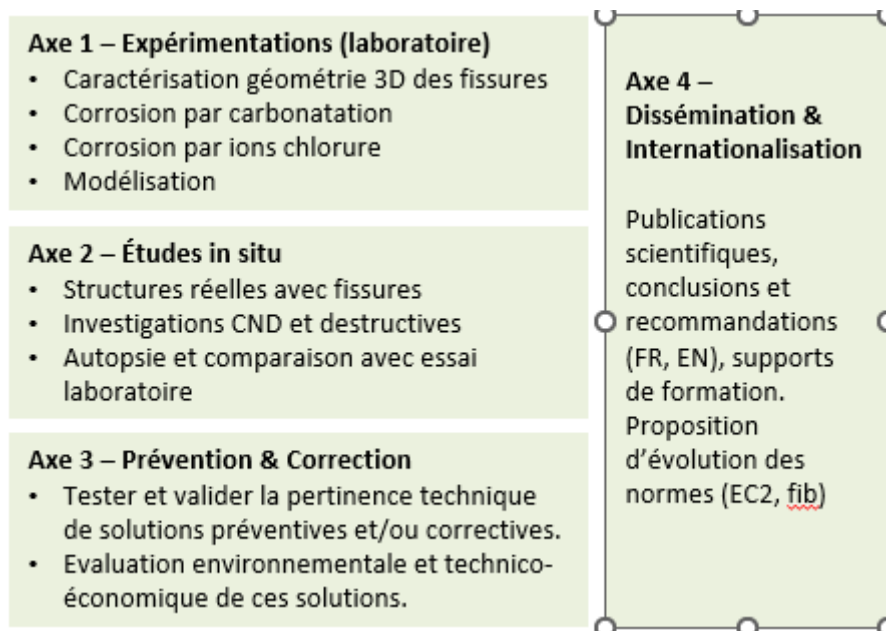
3 Programme de recherche

Les actions du programme de recherche du PN CraCoDub sont structurées en 4 axes étroitement couplés dans une démarche itérative comme suit :

- Axe 1. Expérimentations en laboratoire : fournit les outils expérimentaux, les protocoles et les connaissances fondamentales
- Axe 2. Etudes in situ sur structures réelles : assure la confrontation et la validation de ces acquis sur structures existantes
- Axe 3. Evaluation d'actions préventives ou correctives : mobilise ces résultats pour évaluer des actions préventives et correctives pertinentes
- Axe 4. Dissémination et internationalisation : assure la diffusion des résultats et le transfert vers la normalisation

L'axe 2, consacré aux études sur structures réelles, et l'axe 3, dédié aux actions préventives et correctives, présentent des interactions fortes avec l'axe 1. Les observations, mesures et analyses réalisées sur les structures existantes dans le cadre de l'axe 2 constituent une source essentielle d'informations. Les mécanismes identifiés en laboratoire dans l'axe 1 pourront en effet être validés sur structures réelles. L'axe 2 permettra également d'orienter, définir et hiérarchiser les actions complémentaires de l'axe 1. Enfin, les protocoles expérimentaux déployés, ainsi que les résultats obtenus dans l'axe 1, seront de nature à servir de base pour tester l'efficacité des solutions développées dans l'axe 3.

Cette articulation garantit la cohérence scientifique du projet, la robustesse des conclusions, et le lien effectif entre recherche fondamentale et applications opérationnelles.



3.1 Axe 1 - Expérimentations en laboratoire

Pilotes : Fabrice DEBY (LMDC)

3.1.1 Objectifs

Les objectifs de l'axe 1 sont nombreux et couvrent un large éventail d'aspects scientifiques et techniques, de la mécanique aux mécanismes de transfert dans les fissures, jusqu'à la propagation de la corrosion. Ils visent à comprendre de manière approfondie les mécanismes de fissuration puis de corrosion. Ces objectifs incluent, entre autres, la visualisation et la caractérisation 3D des fissures, la détermination des mécanismes de corrosion prédominants, et le suivi de l'évolution des processus de corrosion.

Ces enjeux nécessitent un travail de recherche approfondi. Dans ce cadre, compte tenu des biais méthodologiques soulignés dans l'état de l'art, une attention particulière sera portée à la conception de protocoles expérimentaux afin d'assurer la reproductibilité des résultats et la validité des conclusions à l'échelle nationale et internationale.

Le traitement de ces objectifs se fera à la fois dans le cadre du PN et dans celui d'un projet ANR associé, le projet BETTER-Dub déposé auprès de l'ANR. La collaboration entre les différents acteurs du PN et ceux du projet ANR (PRCE avec les laboratoires LMDC, LaSIE, GeM, EMGE et le partenaire industriel EGIS) sera primordiale pour atteindre ces objectifs ambitieux, et facilitée par la participation d'acteurs communs au PN et au projet ANR BETTER-Dub.

Les principaux résultats scientifiques et fondamentaux seront produits dans le cadre du projet ANR associé. Ils constitueront le socle scientifique nécessaire pour alimenter le PN, en apportant des connaissances approfondies sur les mécanismes de fissuration et de corrosion, ainsi que sur leur modélisation. Dans le cadre du PN, des essais complémentaires ciblés seront menés de manière spécifique afin de conforter certains résultats issus du projet ANR BETTER-Dub ou de répondre à des questions scientifiques particulières, directement liées aux besoins du programme de recherche et identifiées dans les autres axes. Ces essais auront donc vocation à valider, affiner ou compléter les acquis fondamentaux.

3.1.2 Thème 1 : Étude des fissures et de leur géométrie au voisinage de l'armature

L'objectif du thème 1 est d'acquérir une vision réaliste du faciès 3D des fissures dans le béton, afin de mieux caractériser leurs ramifications et leurs ouvertures au droit des armatures. Le choix du mode de fissuration (flexion, traction, retrait empêché) sera défini en fonction des priorités des travaux et des objectifs du PN. Des protocoles de fissuration seront ainsi mis au point pour reproduire et stabiliser des typologies précises. Une méthode d'imprégnation (Ammouche et al., 2000) sera utilisée pour des observations par microscopie optique à bon rendement afin de quantifier les ouvertures et longueurs de fissures dans l'épaisseur d'enrobage, voire au-delà. Des observations issues de l'imagerie 3D par tomographie X viendront compléter et valider cette méthodologie. Le recours à la tomographie X sera restreint compte tenu du coût de la technique et de la limite de taille des échantillons. En lien avec le thème 3, l'étude visera à identifier les paramètres influençant les ramifications et les ouvertures des fissures, tels que l'enrobage, le diamètre des armatures, la qualité du béton, la nature minéralogique et la forme des granulats. Un des objectifs de la modélisation du thème 3 est donc de limiter le plan expérimental du thème 1 en ciblant les facteurs les plus significatifs. Une attention particulière sera portée à la recherche d'un paramètre macroscopique représentatif de l'ouverture maximale des fissures. Il s'agira également d'évaluer une éventuelle corrélation entre la contrainte dans l'armature et l'ouverture des branches de fissure à l'interface armature-béton.

3.1.3 Thème 2 : Étude de la corrosion induite par les agents agressifs

3.1.3.1 Thème 2.1 : Étude de la corrosion induite par les chlorures

L'objectif du thème 2.1 est d'analyser l'impact des caractéristiques morphologiques des fissures (largeur, profondeur, ramifications) identifiées au thème 1 sur la pénétration des chlorures et la

cinétique de la corrosion à l'interface acier-béton. Une attention particulière est portée à la compréhension fine des mécanismes de corrosion en fond de fissure, en ciblant notamment les seuils d'induction (ralentissement) et de propagation selon l'ouverture des fissures en lien avec les thèmes 1 et 3. Sur la base des résultats du thème 1, des éprouvettes de béton armé seront confectionnées, puis fissurées avant d'être exposées aux chlorures dans des bancs expérimentaux en immersion (XS2) et en marnage (XS3). Pour les mécanismes de transfert, un travail d'identification des seuils critiques d'ouverture des fissures limitant le renouvellement des chlorures sera effectué en fonction de la classe d'exposition. Des protocoles expérimentaux seront également à définir sur le suivi de la concentration des chlorures et du pH à l'interface acier-béton pour les deux classes d'exposition et les configurations identifiées dans le thème 1, permettant ainsi de déterminer les seuils d'initiation de la corrosion. Sur la propagation de la corrosion, une instrumentation par coupons (Hess, 2024) permettant d'évaluer le courant de corrosion sera mis en place toujours suivant les deux conditions d'exposition. Le travail inclut la quantification des contributions micro et macropiles du système de corrosion, en lien avec le thème 3 pour la modélisation. L'effet de la cicatrisation, par auto-cicatrisation et/ou colmatage par les produits de corrosion, sera également évalué. Enfin, les effets de chargement et déchargement sur la fissuration et la propagation de la corrosion seront investigués afin de ne pas limiter les conclusions aux conditions quasi-statiques. Les corps d'épreuves seront finalement autopsiés de façon destructive à l'issue du suivi afin de quantifier les produits de corrosion formés.

3.1.3.2 Thème 2.2 : Étude de la corrosion induite par carbonatation

La corrosion induite par la carbonatation du béton est fortement dépendante de la teneur en eau du matériau et de l'interface acier-béton : la corrosion ne se produit qu'à forte humidité relative ambiante ou en cas d'immersion (Stefanoni et al., 2018). Dans la continuité de l'approche proposée par (Ghantous et al., 2017), les travaux du thème 2.1 seront donc axés sur la corrosion en conditions de cycles d'humidification/séchage, correspondant à la classe d'exposition XC4. Sur la base des protocoles proposés par le thème 1, des éprouvettes de béton armé seront confectionnées puis fissurées dans l'objectif d'étudier l'influence de la fissuration sur le mécanisme de corrosion en cas de carbonatation. Dans un premier temps, un protocole de carbonatation accélérée sera mis au point pour obtenir, dans un temps raisonnable, une carbonatation de l'interface acier-béton suite à la diffusion du CO₂ à travers le faciès de fissuration. Dans un deuxième temps, un dispositif d'humidification/séchage des éprouvettes sera conçu pour garantir une augmentation de la teneur en eau à l'interface acier-béton nécessaire à la propagation de la corrosion. L'humidification sera réalisée par aspersion directe des éprouvettes pour simuler l'effet de la pluie. Ces protocoles seront optimisés avec l'aide de modèles de transfert réactifs en lien avec le thème 3. Les éprouvettes fissurées testées pendant les phases de carbonatation puis d'humidification/séchage seront instrumentées là encore par coupons pour un suivi en continu de la corrosion de l'armature. L'étude en condition de carbonatation s'intéresse aussi à l'influence des conditions hydriques sur la corrosion. Cette influence sera évaluée en faisant varier le ratio temps d'humidification/temps de séchage, paramètre qui n'avait pas été pris en compte dans les travaux précités. L'autopsie des éprouvettes en fin d'essai devrait permettre d'évaluer le colmatage éventuel des fissures proches de l'armature et d'en déterminer l'origine (produits de corrosion, carbonatation, auto-cicatrisation par hydratation des anhydres résiduels du ciment, ...).

3.1.4 Thème 3 : Modélisation des effets de phénomènes de corrosion

L'objectif de ce thème 3 est de développer une approche visant à améliorer la modélisation des effets des phénomènes de corrosion des armatures en présence de fissures dans des structures en béton armé. En effet, il s'agit de proposer un cadre de modélisation capable de représenter de manière réaliste la cinétique d'ouverture des fissures et leur géométrie locale, en lien avec les contraintes mécaniques initiales, les conditions environnementales, les propriétés matériaux (et leur variabilité), les caractéristiques géométriques des corps d'épreuve, et la position des armatures. Dans le cadre de cette étude, une analyse critique des modèles existants (Liu et al., 2022) (Chang et al., 2024) (Fang et al., 2024) (Martinez-Pañeda, 2024) sera menée afin d'identifier leurs limites et de construire des

modèles plus représentatifs de la réalité. Cette analyse s'appuiera sur des jeux de données expérimentales déjà disponibles (tomographie X, imagerie de haute résolution, mesures électrochimiques, ...)(Hess, 2024). Par ailleurs, l'identification des facteurs gouvernant l'évolution des fissures (orientation, ramification, largeur) et leur interaction avec les processus de transfert des agents agressifs, ainsi que d'initiation et de propagation de la corrosion, constitue un verrou scientifique central qui doit être impérativement précisé. Les résultats issus du thème 3 apporteront des éléments qui contribueront à la conception de plans expérimentaux bien ciblés pour les thèmes 1 et 2. L'approche mise en place visera à coupler les modèles mécaniques de fissuration avec les modèles de transport des agents agressifs et les modèles électrochimiques de corrosion. Ce couplage mécanique et multiphysique constitue un levier essentiel pour une modélisation prédictive applicable à l'évaluation de la durée de vie des structures en béton armé dans des conditions réalistes et réelles.

3.2 Axe 2 - Etude in situ sur structures réelles

Pilote : Abdelkrim Ammouche (SETEC LERM)

3.2.1 Objectifs

L'axe 2 vise à vérifier la similarité des phénomènes étudiés en laboratoire avec ceux pouvant être identifiés sur ouvrages réels, en particulier en termes de faciès des fissures du béton d'enrobage et des mécanismes de corrosion en fond de fissure potentiellement présents.

Les données d'ouvrages réels permettront également d'alimenter les modèles de prévision de la corrosion qui seront développés dans le cadre de l'axe 1.

3.2.2 Ouvrages cible et exemples

3.2.2.1 Caractéristiques de l'ouvrage cible idéal - critères de sélection

Le profil idéal des ouvrages que nous recherchons est le suivant :

- Ouvrage de génie civil âgé typiquement de 15 à 30 ans (voire davantage si le béton d'enrobage est de haute compacité).
L'objectif est d'étudier ce qui se passe en fond de fissure pour des ouvrages ayant déjà un âge respectable tout en veillant à ne retenir que des éléments pour lesquels la pénétration des agents agressifs à travers l'enrobage est encore loin d'avoir atteint les armatures en zone non fissurées.

Ce dernier point est fondamental car si on observe de la corrosion en fond de fissure, il faut être certain que son origine provient uniquement de la pénétration des agents agressifs via la fissure et non à travers l'enrobage.

Notons que si, sur un ouvrage donné, il apparaît que ce n'est ponctuellement pas le cas, du fait, par exemple, d'un enrobage localement insuffisant, il faudra veiller à ce que les fissures retenues pour l'étude soient suffisamment éloignées de ces zones ponctuelles pour être certain qu'il n'y a pas d'interaction électrochimique entre les zones (par exemple : effet de protection cathodique des zones d'étude sur fissures par la présence de zones anodiques à proximité).

- Ouvrage situé dans l'une des classes d'exposition suivantes :
 - XS3 (Chlorures d'origine marine, XSm : exposition au marnage/projection, XSe : exposition aux embruns)
 - XD3 (Chlorures, exposition aux sels de déverglaçage)
 - XC4 (Carbonatation, exposition à des cycles d'humidité/séchage)
- Pour lequel on dispose d'un DOE :
 - Plans de coffrage, plans de ferrailage, données sur la formule de béton et sur les mesures issues du contrôle qualité pendant la construction,
 - Note de calculs,
 - Fiches d'inspections avec relevé des fissures et suivi de leur évolution dans le temps.
- Béton mis en œuvre réputé de bonne qualité (au regard de la classe d'exposition) et ne présentant pas de pathologie avérée de type RSI, RSE, ou RAG.
- Structure présentant des fissures d'ouverture significatives, si possible dans la gamme 0,3-1mm, voire plus, dues au retrait thermique au jeune âge, au retrait de dessiccation ou d'origine mécanique ou structurale (par exemple tassements différentiels et/ou avec présence ou non de trace de corrosion).

ET/OU

Présentant des fissures de faible ouverture (conforme aux limitations de fissure du projet) [0,05 à 0,2 mm, voire 0,3 mm] avec présence évidente de traces de corrosion significative.

Point important : les analyses de ces ouvrages nécessiteront de prélever des carottes dans l'axe de fissure et contenant une armature afin d'étudier le faciès de la fissure au voisinage de l'armature, les produits de colmatage et les produits de corrosion, et de mesurer le degré de corrosion des armatures. De ce fait, il pourra être nécessaire de privilégier des ouvrages susceptibles d'être voués à une démolition à courte échéance.

3.2.2.2 Exemples de cibles

Les cas décrits ci-dessous peuvent constituer des exemples de cible à investiguer :

- Corps d'épreuve du PN BHP 2000 (site de La Rochelle XS3, site de Champs-sur-Marne XC4).
- Traverses usagées de chemin de fer en béton (âge 40/50 ans) sous réserve d'absence de carbonatation ayant atteint les armatures en zones non fissurées.
- Dalle de pont mixte au voisinage d'une pile (fissuration importante mais agressivité limitée sauf en XS1).
- Revêtement d'une entrée de tunnel (béton épais et relativement faiblement armé susceptible de présenter des fissures assez larges).
- Voile de mur de soutènement fissuré du fait du bridage du voile sur la semelle.
- Structure fissurée du fait d'un tassement différentiel.
- Ouvrage d'autoroute devant être démoli pour cause d'élargissement (par exemple PS et PI de l'A10 entre Tour et Angers).

3.2.3 Méthodologie

L'étude sur ouvrage existant comprend les étapes successives suivantes :

- Etape 0 : Pré-sélection de l'ouvrage sur la base de l'analyse du DOE complété si besoin par une visite.
- Etape 1 : Première intervention sur l'ouvrage visant à évaluer les critères de sélection (paragraphe 3.2.2 à partir d'un programme d'investigations préliminaires comprenant des mesures non destructives en zones fissurées et non fissurées, des prélèvements de carottes de béton seulement en zones non fissurées et des caractérisations ciblées des échantillons de béton en laboratoire.
- Rapport provisoire de synthèse.
- Point d'arrêt. Validation définitive de l'ouvrage pour le projet (le cas échéant) et adaptation du plan d'investigation aux caractéristiques de l'ouvrage.
- Etape 2 : Seconde intervention sur l'ouvrage, visant à caractériser de manière plus complète les zones fissurées.

3.2.4 Organisation type d'une intervention

3.2.4.1 Etape 0 : Pré-sélection d'un ouvrage – étude des données existantes

Il s'agit de la première étape visant à vérifier les critères de sélection d'un ouvrage pour le projet, sur la base du DOE.

Des prises contacts et échanges préalables avec le MOA permettront de pré-identifier un ouvrage cible, de présenter la méthodologie d'étude et d'obtenir l'accord du MOA pour réaliser, le cas échéant, les

investigations et prélèvements d'échantillons. Cela permettra également de récupérer le DOE si disponible.

Selon les éléments disponibles, l'analyse de ce dossier visera en particulier à :

- Etudier la formule de béton, les notes de calcul, les plans de coffrage et de ferrailage, les contrôles qualité, les informations à la réception de l'ouvrage.
- Etudier les données des rapports d'inspection, de visite ou de diagnostic.
- Vérifier la présence de fissures intéressantes pour le projet.
- Vérifier l'absence de pathologies connues ; les ouvrages présentant des réactions de gonflement RGI ou des attaques chimiques externes ne seront pas retenus pour le projet.

Cette analyse pourrait être complétée par une visite de l'ouvrage.

La validation de cette étape permettra d'enclencher la première intervention sur l'ouvrage (étape 1).

3.2.4.2 Etape 1 : Première intervention – investigations préliminaires

Cette étape vise à mener les investigations sur site et en laboratoire dans le but de connaître l'état des matériaux (béton et armatures) dans des zones fissurées et non fissurées. Seront en particulier étudiés la composition du béton, l'état de progression des agents agressifs (chlorures et carbonatation), les épaisseurs d'enrobage et la qualification de l'activité de corrosion des armatures.

On distinguera deux types de zones d'investigations :

- Type 1 : zone englobant la (ou les) fissure(s) d'intérêt.
- Type 2 : zone courante suffisamment éloignée de la (des) fissure(s).

Des investigations non destructives ou très peu destructives seront réalisées en zones fissurées et non fissurées, tandis que les prélèvements seront, à ce stade, réalisés uniquement en zone non fissurée en évitant les armatures.

L'intervention sur site permettra de mener les investigations suivantes :

- o Cartographie au scléromètre (NF EN 12504-2), dans le but de vérifier/qualifier l'homogénéité du béton de chaque zone.
- o Examen de la fissuration de l'élément d'ouvrage, mesures des ouvertures des fissures en surface et sélection des zones d'intérêt.
- o Description des fissures observées, report sur plan ou schéma, photographies. Mesure de(s) ouverture(s) au fissuromètre Saugnac en plusieurs points le long de la fissure.
- o Recherche d'éventuels symptômes visibles de corrosion dans chaque zone d'étude.
- o Détection des armatures et mesures des épaisseurs enrobages (distribution) par méthode radar (2 m² par zone).
- o Cartographie de potentiel de corrosion (RILEM TC 154-EMC) (2 m² par zone).
- o Mesures de vitesse de corrosion (RILEM TC 154-EMC), a minima en deux points de potentiels extrêmes.
- o Mesures de résistivité électrique (RILEM TC 154-EMC) (2 m² par zone).
- o Réalisation d'ouvertures pour dégager et visualiser deux armatures ; classement selon critères Cefracor, prise de vues photographiques. Une solution de tymolphtaléine sera appliquée au droit de chaque ouverture en complément.

- o Prélèvement de quatre (4) carottes de béton ($\varnothing \approx 80$ à 100 mm, L 200 mm) en zone non fissurée (type 2).
- o Rebouchage des trous de carottage à l'aide d'un mortier prêt à l'emploi adapté aux classes d'exposition de l'ouvrage.
- o Illustration photographique de l'ensemble des zones d'investigation.

L'étude des échantillons de béton au laboratoire comprendra les essais suivants (zone non fissurée) :

- o Mesure de profondeur de carbonatation par phénolphthaléine (NF EN 14630) (3 mesures)
- o Mesure de teneurs en chlorures libres et totaux (mode opératoire AFREM) (2 profils, 4 profondeurs/profil)
- o Estimation de la composition du béton : type et dosage en ciment, rapport E/C, dosages en granulats siliceux et calcaires, comprenant les mesures de masses volumiques et de porosité (1 échantillon moyen à cœur)
- o Examen par MEB-EDS. Vérification de l'absence de pathologies physico-chimiques (2 profondeurs – surface/cœur, sur une carotte).

La synthèse et l'analyse de l'ensemble des résultats des investigations permettront de statuer définitivement sur l'adéquation entre l'état de l'élément d'ouvrage et la représentativité des fissures à étudier pour le PN CraCoDub. La validation de l'ouvrage à cette étape permettra d'enclencher les investigations approfondies pour étudier les zones fissurées (étape 2).

3.2.4.3 Contractualisation

Le contenu de l'étape 1 (ainsi que l'étape 2, voir chapitre suivant §3.2.4.4) devra très certainement faire l'objet d'une contractualisation avec le maître d'ouvrage et les éventuelles autres parties concernées.

Il a donc été prévu un budget pour la préparation d'un canevas visant à faciliter cette contractualisation. Ce canevas définira notamment les points suivants (liste non exhaustive) :

- o La description des opérations qui seront effectuées.
- o Les dates et les conditions d'intervention.
- o Les règles particulières de sécurité.
- o Le partage des rôles et des responsabilités entre les différents intervenants et l'identification des entités qui prennent en charge les coûts associés.
- o Politique de communication/confidentialité.
- o Eventuelles assurances.

3.2.4.4 Etape 2 : Investigations approfondies au droit de la (ou des) fissure(s)

Seule la ou les zones fissurées seront étudiées lors de cette deuxième étape. Il s'agira en principe des zones de type 1 étudiée à l'étape 1.

L'intervention sur site permettra de mener les investigations complémentaires suivantes :

- o Mesures d'enrobage de armatures (si nécessaire à l'issue de l'étape 1).
- o Mesures de potentiel et de vitesse de corrosion.
- o Mesures de résistivité électrique.

- o Repérage et implantation des carottages au droit de la (des) fissure(s) d'intérêt (ouvertures en surface > 0,3 mm). Les carottages seront réalisés à l'intersection entre une fissure et une armature.
- o Définition de la zone à injecter de résine époxy englobant la zone de prélèvements.
- o Injection de la fissure à la résine époxy avant prélèvement. Tâche à réaliser par une entreprise spécialisée en réparation du béton armé.
- o Prélèvement de carottes de béton :
 - § Élément d'ouvrage à déconstruire : 10 carottes
 - § Élément d'ouvrage à conserver : 5 carottes
- o Rebouchage des trous de carottage.
- o Réparation des zones de carottages sur fissures dans le cas d'un ouvrage à conserver. Tâche à réaliser par une entreprise spécialisée en réparation du béton armé.

L'étude des échantillons de béton au laboratoire comprendra les essais suivants (zone non fissurée) :

- o Tomographie X. Examen du faciès de fissuration 3D (sous réserve de validation de la faisabilité).
- o Examen du faciès de fissuration 2D par examen au microscope optique de plaques polies recoupant des armatures selon un plan vertical (parallèle au parement) ou horizontal (perpendiculaire au parement). Mesure de l'ouverture de la fissure en fonction de la profondeur, examen de ramifications éventuelles, caractérisation du contact armature-béton.
- o Examen au MEB. Caractérisation des produits de corrosion. Recherche d'éventuels produits de colmatage de la fissure (produits de corrosion calcite, hydrates...). Caractérisation de la microstructure de la matrice de part et d'autre de la fissure (gradient de porosité ?).
- o Caractérisation de la pénétration des agents agressifs perpendiculairement à la fissure et en fond de fissure. Test à la phénolphthaléine (carbonatation) et test colorimétrique au nitrate d'argent (chlorures).
- o Autopsie de l'armature : examen qualitatif de l'état de corrosion éventuelle autour de la fissure. Estimation de la perte de matière après élimination des produits de corrosion (principe de la norme NF EN ISO 8407).
- o Mesures complémentaires de la résistivité électrique sur disques de béton sur les carottes prélevées à l'étape 1 (XP P18-481).

Tableau 4 : Répartition prévisionnelle des essais de l'étape 2 – Version haute (ouvrage à déconstruire)

	Qté	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Tomographie X	1	X									
Sections polies Faciès de fissuration 2D (2 échantillons plans verticaux + 2 échantillons plans horizontaux)	4		X	X	X	X					
Examen MEB Produit de colmatage,	4		X	X	X	X					

produits de corrosion, microstructure											
Examen du front de carbonatation	6		X	X	X	X	X	X			
Examen du front de chlorures	3					X	X	X			
Autopsie des armatures	7	X	X	X	X	X	X	X			
Estimation de la perte de matière des armatures	3					X	X	X			
Résistivité électrique XP P18-481	1	Pm*									
Rc	3								X	X	X

(*) carottes de l'étape 1

Tableau 5 : Répartition prévisionnelle des essais de l'étape 2 – Version basse (ouvrage à conserver)

	Qté	C1	C2	C3	C4	C5
Tomographie X	1	X				
Sections polies Faciès de fissuration 2D (2 directions)	4		X	X	X	X
Examen MEB Produit de colmatage, produits de corrosion, microstructure	2				X	X
Examen du front de carbonatation	4		X	X	X	X
Examen du front de chlorures	3			X	X	X
Autopsie des armatures	5	X	X	X	X	X
Estimation de la perte de matière des armatures	2			X	X	
Résistivité électrique XP P18-481	1	Pm*				

(*) carottes de l'étape 1

3.3 Axe 3 - Evaluation d'actions préventives ou correctives

Pilotes : Laurent Boutillon (VINCI Construction), Lavinia Stefan (GINGER)

3.3.1 Contexte et objectifs

Les acteurs de la filière (cimentiers, chimistes, électro chimistes, fabricants d'adjuvants, fournisseurs de fibres et d'armatures...) ont développé diverses solutions techniques visant à améliorer la durabilité des ouvrages en béton armé/précontraint. Ces solutions poursuivent plusieurs finalités :

- Limiter la fissuration des structures, notamment celle liée au retrait.
- Réduire les défauts critiques tels qu'une qualité insuffisante de l'enrobage, identifiés comme ayant un impact majeur sur la corrosion.
- Atténuer les conséquences des fissures vis-à-vis de la corrosion, par des mécanismes tels que :
 - Accélérer le colmatage ou la cicatrisation des fissures.
 - Inhiber ou bloquer les processus de corrosion.
 - Freiner la pénétration des agents agressifs par la fissure, via des moyens physiques ou chimiques.

Bien que certaines de ces solutions soient déjà largement utilisées en Asie et sur le continent Américain, leur adoption en Europe, et particulièrement en France, demeure marginale. Plusieurs facteurs expliqueraient cette situation :

- Manque de compréhension des mécanismes d'action, en contradiction avec l'approche rationnelle privilégiée en France.
- Performances essentiellement qualitatives, difficiles à quantifier au cas par cas, ce qui complique l'évaluation technico-économique.
- Incertitude sur la compatibilité avec des solutions ultérieures.
- Questionnement sur la durabilité des effets attendus.
- Cadre normatif inadapté à une utilisation généralisée.

Ainsi, l'axe 3 vise à évaluer de manière rigoureuse et documentée l'efficacité et la pérennité des solutions préventives ou correctives destinées à limiter l'impact de la fissuration et des autres facteurs défavorables sur la durabilité des structures exposées à la corrosion.

Les expérimentations s'appuieront sur les protocoles définis dans l'axe 1, incluant :

- la définition de la géométrie des corps d'épreuve ;
- les formulations de référence des bétons ;
- la méthodologie de fissuration et de maintien de l'ouverture des fissures ;
- la méthodologie de caractérisation 3D du faciès de fissure ;
- les modalités d'exposition des corps d'épreuve ;
- la méthodologie de mesure de la cinétique de corrosion ;
- les modalités de réalisation des autopsies.

Le détail des campagnes d'essais nécessitera d'être adapté au coup par coup aux effets spécifiquement attendus du produit, en fonction de son mode d'action sur la fissuration ou sur la cicatrisation du béton.

Ces campagnes seront complétées par des essais additionnels, définis au cas par cas, visant à identifier et à vérifier l'absence d'éventuels effets secondaires sur les propriétés des bétons, telles que la rhéologie, la résistivité, la vitesse de carbonatation ou la migration des ions chlorure, entre autres.

Les résultats de expérimentations de l'axe 1 serviront de références comparatives permettant de quantifier l'effet des solutions testées « toutes choses égales par ailleurs ». L'axe 3 est ouvert aux fournisseurs et applicateurs de solutions technologiques. Il est structuré en quatre sous-thèmes.

3.3.2 Axe 3 - Thème 1 : Actions préventives mises en œuvre en amont du bétonnage

Cet axe porte sur les solutions mises en œuvre dès la phase d'étude de formulation du béton. Ces solutions incluent notamment des adjuvants et autres produits incorporés dans la masse du béton. Les familles de produits susceptibles d'être testées sont listées dans le Tableau X (liste non exhaustive) :

Tableau 6 . Familles de produits qui pourraient être testées dans le cadre de l'Axe 3, Thème 1 (Actions préventives mise en œuvre en amont du bétonnage)

Famille de produit	Sous-famille	Mécanisme de base	Effet attendu
Agents limitant le retrait	Produits de cure interne	Les polymères super absorbants (SAPs)	Réduction du retrait autogène par apport d'eau
	Produits tensio-actifs	Réduction de la tension interfaciale entre les pores capillaires et l'eau, diminuant la pression capillaire responsable du retrait	Limitation du retrait total permettant de limiter la fissuration du au retrait
Agents compensateurs de retrait	Agents ettringitiques (expansion précoce)	Les ACR à base de chaux et/ou de sulfoaluminate de calcium agissent selon le mécanisme de la pression de cristallisation de l'Ettringite précoce	Absence ou réduction de l'ouverture des fissures jeune âge
	Produits à base de MgO.	Retrait compensé par un gonflement de la Brucite. La réactivité du MgO est contrôlée par le choix de la température de cuisson afin que les gonflements soient sensiblement concomitants aux retraits	Idem
Agents favorisant la cicatrisation	Cristallisants à base de silicate ou de minéraux réactifs	Réaction avec les produits d'hydratation du ciment pour former des cristaux insolubles	Favoriser la cicatrisation des microfissures
	Produits biologiques	Favorisent une Bio-calcification participant à la cicatrisation des fissures	Favoriser la cicatrisation des microfissures

INHIBITEUR DE CORROSION	Inhibiteurs de corrosion en masse	Formation d'une couche passive de Fe ₂ O ₃ ou d'un film hydrophobe sur l'acier	Réduction significative du taux de corrosion
HYDROFUGE DE MASSE	Hydrofuges de masse	Création d'une barrière hydrophobe dans la matrice du béton	Limitation des transferts d'eau dans le béton
Agents de cohésion	Fibres métalliques ou synthétiques	Limite la fissuration de surface et modification éventuelle du faciès des fissures en profondeur	Limiter l'ouverture des fissures pour des mêmes niveaux de contrainte de traction, quelle qu'en soit l'origine (retrait gêné, mécanique)
Armatures présentant intrinsèquement une résistance accrue à la corrosion	Armature inox	Insensibilité aux produits de corrosion	Pas de corrosion
	Armature MMX	Sensibilité limitée aux produits de corrosion grâce au chrome Forte limite élastique	Bien meilleur comportement que l'acier standard en présence de chlorure.
	Armatures galvanisées	Protection temporaire de moyenne durée des armatures contre la corrosion par effet d'anode sacrificielle	Décalage temporel de l'amorce de la corrosion.

Des fiches par famille de produits sont disponibles en annexe 1. Celles-ci reposent sur des données déclaratives fournies par les fabricants et présentent de manière synthétique les mécanismes physico-chimiques mis en jeu, les dosages approximatifs, l'impact attendu sur la mise en œuvre, les effets escomptés sur la fissuration de surface, l'influence sur l'ouvrabilité et sur le développement de la résistance à la compression, ainsi que les conséquences sur la durabilité des ouvrages (maintenance), l'impact financier, l'empreinte carbone et d'autres paramètres associés.

À titre de référence, des technologies de protection cathodique (courant imposé ou anodes sacrificielles) sont également mentionnées. Ces solutions sont aujourd'hui maîtrisées et couramment utilisées, elles ne constituent donc pas un axe de recherche prioritaire dans le cadre du projet CraCoDub. Elles pourront toutefois servir de base de comparaison pour l'évaluation technico-économique et environnementale de ces solutions.

3.3.3 Axe 3 - Thème 2 : Actions préventives / correctives mises en œuvre en aval du bétonnage

Ce thème concerne l'évaluation qualitative et quantitative de l'efficacité sur la durabilité de traitements appliqués après la construction. Ces traitements peuvent être destinés à corriger ou atténuer les effets de problèmes potentiels ou avérés de réalisation comme l'apparition de fissures en surface du béton dépassant les limites admises dont l'apparition est liée à des problèmes de cure, de défauts de bétonnage, de retrait thermique ou hydrique empêché.

Il peut s'agir de :

- Solutions mises en œuvre pour limiter les risques de “top bar effect” (décohésion entre une armature orientée horizontalement et le béton sous l'effet du ressuage et du tassement de ce dernier.
- Revêtements de surface hydrophobes ou étanches : silanes, siloxanes, revêtements filmogènes.
- Cristallisants appliqués en surface.
- Cicatrisants ou Bio-cicatrisants appliqués en surface.
- Inhibiteurs de corrosion.
- Protection cathodique (pour mémoire).

Les modes d'action de ces solutions sont variés : limiter la pénétration de l'eau et des agents agressifs, favoriser la cicatrisation, ralentir la cinétique de corrosion pour améliorer la durabilité

Tableau 7. Familles de produits qui pourraient être testées dans le cadre de l'Axe 3, Thème 2 (Actions préventives / correctives mise en œuvre en aval du bétonnage)

Famille de produit	Sous-famille	Mécanisme de base	Effet attendu
Hydrofuges de surface	Silanes et Siloxanes	Hydrophobisation	Réduction de l'humidité et de la pénétration des agents agressifs
	Silicates (lithium, sodium, potassium)	Densification de surface, action hydrofuge limitée	Réduction de la porosité capillaire.
Cicatrisant ou Bio-cicatrisants en surface	Cristallisants	Réaction avec les produits d'hydratation du ciment pour former des cristaux insolubles	Contribution à la cicatrisation des fissures si elles sont peu ouvertes par pénétration. Contribution à la fermeture de la porosité de surface et donc à la limitation des échanges hydriques
Inhibiteur de corrosion	Inhibiteurs Anodique Ex : nitrite de calcium	Contrôle anodique de la corrosion en modifiant chimiquement la surface du béton ou en créant une pellicule passive qui stabilise la couche passive	Ralentissement/arrêt de la corrosion Efficacité d'un inhibiteur de corrosion appliqué en surface fortement liée à sa capacité à migrer, via la fissure ou à travers l'enrobage jusqu'à l'armature pour pouvoir agir sur celle-ci.
	Inhibiteurs Mixte Cathodique/anodique Ex : Nitrites+ composés organiques	Contrôle anodique et ralentissement de la réaction de réduction au niveau de la cathode	

Injections des fissures	Coulis de ciment ultrafin ou résines polymères	Remplissage des fissures	Remplissage des fissures dépassant les ouvertures admissibles pour empêcher la pénétration d'agents agressifs dans la fissure et, éventuellement, pour restaurer une résistance mécanique en traction
-------------------------	--	--------------------------	---

3.3.4 Axe 3 - Thème 3 : Solutions exploratoires

Ce thème, est à l'heure actuelle ouvert même s'il n'y a pas encore de solution candidate qui s'est déclarée pour lancer une étude spécifique. Il concerne l'étude de l'influence de liants ou adjuvants exploratoires sur le développement de la fissuration (faciès) et/ou sur l'évolution de la corrosion en fond de fissure. Le terme « exploratoire » indique qu'il s'agit de produits pas encore normalisés ou pas encore disponibles sur le marché. Il peut s'agir par exemple de liants ultra bas carbone, de liant dans lesquels on a incorporé du carbone biogénique, ou autres produits innovants modifiant le comportement classique d'un béton (retrait compensé, ...)

3.3.5 Axe 3 - Thème 4 : Évaluation technico économique des solutions et recommandations

Ce thème de travail vise à fournir à la communauté une synthèse/des recommandations abordant les points suivants :

- Une synthèse normative nationale et éventuellement internationales associée à l'utilisation de ces produits au cas par cas.
- Une évaluation technico-économique de chaque solution dans l'absolu ou par comparaison à des solutions éprouvées.
- Une évaluation de l'empreinte carbone des solutions dans l'absolu ou par comparaison à des solutions existantes. Les modalités précises de ces évaluations sont vraisemblablement à définir familles par familles. En effet, l'approche expérimentale est différente selon qu'il s'agisse, par exemple, d'une solution mise en œuvre en amont du coulage pour éviter un phénomène ou en aval du coulage pour, par exemple, corriger un défaut constaté.

3.4 Axe 4 : Dissémination et internationalisation

Pilotes : Philippe BISCH (Egis) Olivier Lherminier (Egis), Jean-Michel Torrenti (ESITC)

3.4.1 Contexte et objectifs

Les actions à mener au sein de l'axe 4 visent principalement à faire connaître l'existence du projet, ses objectifs et son avancement au cours de son déroulement, puis à diffuser, le plus largement possible, ses résultats, et conclusions à son issue. Les objectifs principaux sont :

- Faire connaître ses résultats dans le monde académique et l'ensemble de la communauté professionnelle concernée, en tant que contribution à l'évolution de la connaissance ; y compris à l'international via des présentations dans des conférences et via d'éventuels partenariats avec des chercheurs travaillant sur les mêmes sujets.
- Porter à la connaissance des groupes directement impliqués dans la codification l'apport des résultats de la recherche sur la question de la durabilité et les propositions éventuelles d'évolution des règles sur ce sujet.

Sur ce dernier point, un accent particulier sera mis sur l'intégration des résultats dans l'évolution des codes et normes de conception, en particulier :

- Le *fib Model Code*, pour adapter les critères liés à l'ouverture des fissures et à la protection contre la corrosion.
- L'Eurocode 2 (TC250/SC2 et au niveau FR le BNTRA CN/EC2), notamment en lien avec la prise en compte des effets de la fissuration et de la durabilité.
- L'annexe nationale de l'Eurocode 2 (BNTRA CN/EC2).

Cette diffusion est donc premièrement française, mais vise essentiellement à être internationale. Elle a un cœur de cible européen, puisque c'est l'échelle appropriée pour l'évolution des normes.

Pour atteindre ces objectifs, plusieurs actions sont envisagées, parallèlement au déroulement du projet, et après la fin de son déroulement scientifique. Ces dernières constituent donc une dernière étape intégrée à la recherche, mais ne comprenant que des actions de promotion.

Objectifs :

- Affiner et diffuser les résultats du projet auprès de la communauté technique et scientifique (*fib*, IABSE, Rilem et AFGC), des acteurs du génie civil et des instances de normalisation.
- Générer des documents de référence sur ce sujet : production d'un fascicule avec les recommandations à la fin du projet (comme le PN CEOS.fr, 244 pages, versions française et anglaise, même éditeur, 2017).
- Favoriser la collaboration et la dissémination à l'international en vue de maximiser l'efficacité sur l'évolution des codes : workshops internationaux, conférences internationales (même par visioconférence).
- Séminaires de dissémination et de formation dans le cadre français.

Cet axe vise ainsi à assurer un impact concret et durable du projet sur les pratiques de conception et de maintenance des infrastructures en béton armé, en s'appuyant sur une approche collaborative et une diffusion efficace des connaissances.

3.4.2 Thème 1 : Comité Scientifique International (CSI)

Le rôle du CSI est multiple dans le cadre de l'Axe 4 :

- Apporter un regard expert, extérieur, et indépendant des membres du projet, sur le contenu et l'avancement de la recherche afin d'émettre des avis et recommandations visant à maximiser la

pertinence et l'excellence scientifique des travaux menés dans le cadre du projet à l'échelle internationale.

- Participer grâce à leurs connaissances et à leurs réseaux à une veille internationale sur les travaux de recherche, en cours ou à venir, proches de ceux du PN.
- Contribuer via une connaissance détaillée du projet et de ses résultats ainsi que via la reconnaissance de la communauté scientifique dont ils font l'objet, à la diffusion à international du contenu de la recherche et de ses résultats.

Note : Le mode d'action du CSI est décrit plus en détail dans le chapitre 4 « Organisation du projet ».

3.4.3 Thème 2 : Développement de documents de référence

Plusieurs types de documents sont envisagés :

- A destination des chercheurs, une diffusion des rapports les plus appropriés établis au cours de la recherche pourra être envisagée par le projet en fonction de leur intérêt au regard des objectifs. A minima, cette diffusion pourra se faire sous forme d'un rapport de synthèse détaillé.
- A la fin du projet, établir un document de synthèse de la recherche mettant notamment en avant les conclusions et recommandations. Ce document pourra avoir une version préliminaire en français diffusée au niveau national, mais devra surtout avoir une version en anglais sous forme de livre diffusé par un éditeur internationalement reconnu.
- De la part des acteurs de la recherche, des articles dans les journaux scientifiques portant sur des actions et résultats plus précis (par exemple « Structural Engineering » et publications de la RILEM) pour une diffusion large des avancées.
- Un « petit journal » ou newsletter en anglais sur le déroulement du projet pourra être diffusé périodiquement par courriel, aussi largement que possible.
- Des publications lors des conférences internationales en relation directe avec le sujet.

Tous ces documents seront diffusés via un site web décrit plus en détail dans le chapitre 4 « Organisation du projet ».

De plus, des supports pédagogiques et de cours spécialisés seront établis pour les ingénieurs, chercheurs et étudiants, comme décrit dans le thème 5 : Formation.

3.4.4 Thème 3 : Séminaires, Workshops et conférences

Le but des séminaires est d'éveiller la curiosité des parties prenantes potentielles au fur et à mesure du déroulement du projet et à son issue. Dans un premier temps, ils pourront être organisés par l'IREX dans un cadre national, afin de faire découvrir le Projet National en France. Dans un second temps, au fur et à mesure de l'avancement du projet et surtout de l'analyse des résultats, des workshops pourront être organisés à visée plus internationale, donc en langue anglaise.

Ces séminaires et workshops pourront avoir un rythme annuel, mais des échanges intermédiaires seront organisés en visioconférence. A l'issue du projet ANR associé au PN, des séminaires et workshops conclusifs pourront être organisés, si possible sous une égide européenne (par exemple avec JRC), pour présenter ses résultats et promouvoir le livre de synthèse.

Il faut aussi mentionner la participation des membres du projet à des conférences nationales (par exemple CFM, AFPC et CEFACOR) et des conférences internationales liées au sujet (par exemple conférences de la *fib* et de la RILEM).

3.4.5 Thème 4 : Benchmark international

Nous envisageons, dans le cadre de l'axe 4, d'organiser un benchmark ouvert aux laboratoires, entreprises et ingénieries internationales pour tester la pertinence, la fiabilité des méthodes et des approches de calcul pour l'évaluation de la fissuration et de la corrosion. Le principe consiste à définir un « cas d'étude » documenté, faisant l'objet d'un ou plusieurs essais réalisés dans le cadre de l'axe 1 pour servir de base à une modélisation.

Sur cette base, chaque candidat volontaire effectue, à ses frais, une modélisation de l'essai afin de faire une prédiction en aveugle des résultats de l'expérimentation. Ces calculs font ensuite l'objet d'une comparaison entre eux puis d'une comparaison avec les résultats de l'expérience.

Le montage d'un benchmark suivrait le processus suivant

- Etape 1 : sélection de l'expérimentation la plus à même de faire l'objet du benchmark, établissement d'un dossier détaillé décrivant l'expérimentation, l'objet et le règlement du benchmark et décrivant la promotion pour attirer des participants.
- Etape 2 : organisation d'une réunion de lancement du benchmark pour répondre aux questions des participants.
- Etape 3 : benchmark en aveugle. Le but est la restitution par le calcul des futurs résultats de l'expérimentation. En principe, les membres du projet sont exclus du benchmark, mais ils peuvent y participer en « off ». La durée prévisionnelle est d'un an.
- Etape 4 : réunion de présentation des résultats par les équipes participantes. Cette réunion est préférentiellement avec participation physique, elle peut être couplée avec un des workshops visés précédemment.
- Etape 5, éventuellement : mise au point des calculs par les participants pour prendre en compte les résultats de l'expérimentation.

Un rapport de synthèse pourra être établi rassemblant les rapports des différents participants (volontaires) et une synthèse, qui pourra faire partie des documents à diffuser.

Un tel benchmark comporte plusieurs objectifs :

- Il permet de faire connaître aux participants les modèles de comportement utilisés par les autres et de comparer leur efficacité, et ainsi de diffuser les connaissances sur ce sujet.
- Il peut éventuellement influencer sur le déroulement de la partie modélisation de l'axe 1.
- Il permet de discuter des évolutions futures des modèles avec éventuellement plusieurs orientations.
- C'est un moyen très efficace de diffusion de la recherche et de ses résultats dans les milieux experts.

3.4.6 Thème 5 : Formation

Une attention particulière sera portée à la large diffusion en France des connaissances acquises, auprès des professionnels en exercice ou en cours de formation. Pour cela, il sera identifié les enseignements des établissements académiques et de formation continue pouvant être avantageusement enrichis par les données nouvelles issues du PN.

Les livrables de ce thème seraient d'une part une liste des enseignements, des établissements et des publics concernés, et d'autre part un support pédagogique synthétisant les apports scientifiques du PN et les pistes possibles d'évolution des règles de dimensionnement des structures en béton armé qui pourraient en découler.

3.4.7 Thème 6 : Normalisation

L'évolution de la réglementation en vue de minimiser les quantités d'armatures étant l'objectif ultime de ce PN, un accent particulier sera naturellement mis sur l'intégration des apports du PN dans l'évolution des normes et codes de conception, en particulier :

- Le *fib* Model Code, pour adapter les critères liés à l'ouverture des fissures et à la protection contre la corrosion. Notons que passer par le Model Code est important dans la mesure où il sert souvent d'inspiration pour les évolutions des Eurocodes. En effet, le fait que les clauses du Model Code aient déjà fait l'objet d'un large consensus international, plaide pour leur traduction au niveau Européen. Notons que les membres du Comité Scientifique International que nous avons invités sont des personnalités reconnues dans leur pays et à la *fib*.
- Les Eurocodes, notamment en lien avec la prise en compte des effets de la fissuration et de la durabilité.
- L'annexe nationale de l'Eurocode 2 pourra anticiper la prise en compte de ces résultats. A ce titre, ces actions seront réalisées en lien avec le BNTRA CN/EC2 qui s'est dit intéressé à suivre les travaux du PN.

4 Organisation du projet

4.1 Consortium et éléments de gouvernance

L'organisation du projet sera décrite dans la Charte d'adhésion IREX du PN CraCoDub.

Le Projet National CraCoDub sera dirigé par le Comité Directeur qui s'appuiera sur un Comité Scientifique et Technique (CST) pour le pilotage opérationnel du projet.

4.1.1 Le Comité Directeur

Le Comité Directeur (CoDir) ou Assemblée Générale (AG), présidé par le président du PN, est constitué d'un représentant de chaque partenaire, des directeurs scientifiques et technique du projet, de l'administrateur de l'IREX et d'un représentant du Service Recherche et Innovation du Commissariat Général du Développement Durable (CGDD). Le comité directeur détient les pouvoirs de décision concernant le déroulement du projet.

4.1.2 Le Comité Scientifique et Technique

Le Comité Scientifique et Technique (CST) est animé par deux directeurs, un directeur technique issu du monde socio-économique de la construction et un directeur scientifique issu du monde académique. Outre ces directeurs, Il est constitué du président du PN, d'un représentant de IREX en tant qu'administrateur, d'un représentant du ministère ainsi que des pilotes et co-pilotes des groupes de travail du projet. Le CST coordonne et assure le suivi opérationnel du projet. Il veille à la cohérence des travaux et a notamment pour missions de :

- Définir avec précision les actions de recherche à entreprendre dans le cadre du projet, qui sont ensuite approuvées par le Comité de direction.
- Organiser, avec les animateurs des groupes thématiques, la réalisation des actions de recherche.
- Assurer une coordination et la circulation de l'information entre les différents thèmes de recherche.
- Participer à l'organisation des séminaires et workshops.

Le CST s'appuie dans son action sur des groupes de travail.

4.1.3 Bureau

Le bureau est composé du Président, des deux Directeurs Scientifique et Technique, de l'Administrateur du projet (IREX). La mission principale du Bureau est d'assister le CST dans la réalisation du programme d'actions et l'accomplissement de ses missions.

4.1.4 Groupes de Travail

Les Groupes de Travail (GT), a minima un par axe du projet, peuvent être subdivisé en sous-groupe si cela apparait nécessaire. Chaque groupe de travail a notamment pour objectif de suivre les actions de recherche de l'axe ou du sous-axe et de veiller à la production des livrables associés. Le pilotage de chaque GT est confié à un binôme formé d'un représentant du monde opérationnel et d'un représentant du monde académique afin d'assurer un bon équilibre entre les approches théoriques d'une part, et technologiques et d'ingénierie d'autre part.

L'organisation prévisionnelle du projet est présentée dans la Figure 11 :

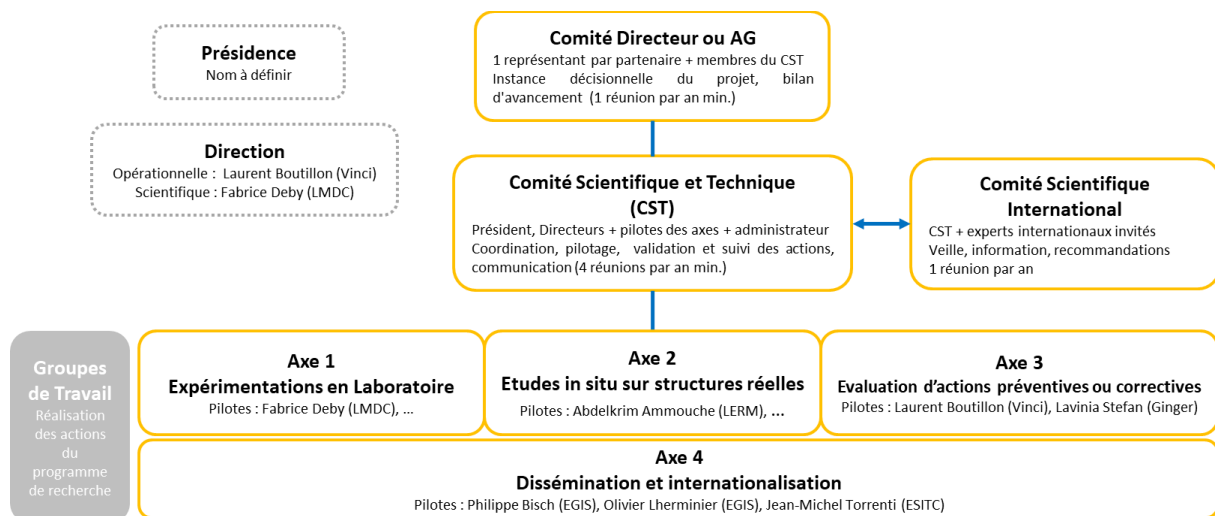


Figure 11 . Organisation et Gouvernance du Projet CraCodub

4.1.5 Partenariat potentiel

A date, les entités listées ci-dessous ont manifesté un intérêt (non formalisé) pour rejoindre le PN CracoDub :

Maitres d'ouvrage : EDF, SNCF, Andra, CEA

Maitres d'œuvre : SGP

Entreprises : Bouygues, VINCI Construction, Eiffage, NGE, Razel Bec

Ingénierie : Egis, SGP, INFRANEO, Addis

Laboratoires & Université : CEREMA, MAST/EMGCU (Université Gustave Eiffel), LMDC (Université de Toulouse - INSA Toulouse - UTTOP), LaSIE (Université La Rochelle), Université de Bourgogne, GeM (Université de Nantes, Ecole Centrale Nantes), LGCGM (INSA Rennes - Université de Rennes), Université Aix Marseille, Université Strasbourg, LRMH, CETU

Laboratoire Privés : LERM, GINGER, CERIB

Cimentiers : Vicat, Holcim (indirectement, à travers France ciment)

Adjuvantiens, Fournisseurs : CHRYSO, Master Builder System, Imerys, Bekaert, Saint Gobin (SEVA)

Syndicats et fédération : FNTP, France Ciment, SNBPE, SYNAD,

Notons que ces manifestations d'intérêt matérialisé par des courriers et des présences aux groupes de travail des axes n'ont pas encore été formalisées de façon engageante.

4.1.6 Site internet du PN et plateforme collaborative

Pour assurer la visibilité du projet auprès du public, un site internet diffusant les principales informations du projet (programme de recherche, gouvernance, consortium, actualités, modalités d'adhésion, résultats finaux) sera mis à disposition par l'IREX. Afin que le PN ait l'impact souhaité au-delà des pays francophones, le site pourra être traduit en anglais (sous coordination de l'IREX et avec l'implication de quelques partenaires).

Pour garantir une fluidité des échanges entre les partenaires du PN, une traçabilité et une sécurisation des données, l'IREX mettra à leur disposition une plateforme collaborative de stockage et

d'organisation des documents produits au fur et à mesure de l'avancement du projet. Cet espace réservé aux partenaires leur permettra d'avoir accès aux différents dossiers en lecture seule ou en lecture/écriture pour les dossiers associés aux groupes de travail ou comités dont ils sont membres actifs.

Le benchmark décrit dans l'Axe 4 utilisera le site internet décrit ci-dessus.

La gestion des deux sites et les droits d'accès de la plateforme seront gérés par l'IREX.

4.2 Comité Scientifique International

Le Comité Scientifique International est constitué d'experts étrangers indépendants dont les compétences, qui sont en rapport direct avec les thèmes et actions du PN, sont reconnus aux niveaux national et international (Voir chapitre 3.4.2).

Le rôle du CSI est essentiellement consultatif. Leur avis, remarques et conseils seront partagés en (Assemblée Générale).

Chaque année, le CSI est invité, par les directeurs du projet, à venir en France pour participer, en amont de l'Assemblée Générale annuelle, à une journée de travail avec le Comité Scientifique et Technique portant sur le contenu et l'avancement des travaux de recherche, sur les résultats obtenus, sur les éventuelles difficultés rencontrées et, d'une façon plus générale, sur tout sujet qu'il apparaîtra pertinent au CST et/ou au CSI d'aborder lors de ces journées de travail.

Ces réunions feront l'objet d'un rapport exprimant les remarques, avis et recommandations des membres du CSI. Il sera visé et éventuellement amendé par les membres du CSI et sera ensuite partagé lors des AG.

Les membres du CSI seront consultés individuellement ou collectivement selon les cas pour donner leur avis sur le contenu des livrables pertinents avant leur finalisation et en particulier sur les conclusions générales du PN.

Les membres du CSI seront invités à relayer les informations sur les objectifs, le contenu et l'avancement du PN puis, en fin de PN, sur les résultats et conclusions du PN. Ils pourront aussi être sollicités pour orienter la participation de membres du PN à des conférences ou présentations dans leurs pays respectifs.

Les membres du CSI effectueront leurs travaux sur la base du volontariat. Néanmoins, les frais de déplacement associés à leurs visites en France seront pris en charge par le projet.

Le groupe de montage a invité à participer à ce comité international trois personnalités connues et reconnues ayant effectué des recherches en lien direct avec les thématiques de recherche du projet et contribuant aux travaux de nature normative, notamment au niveau de la *fib*. Il s'agit de :

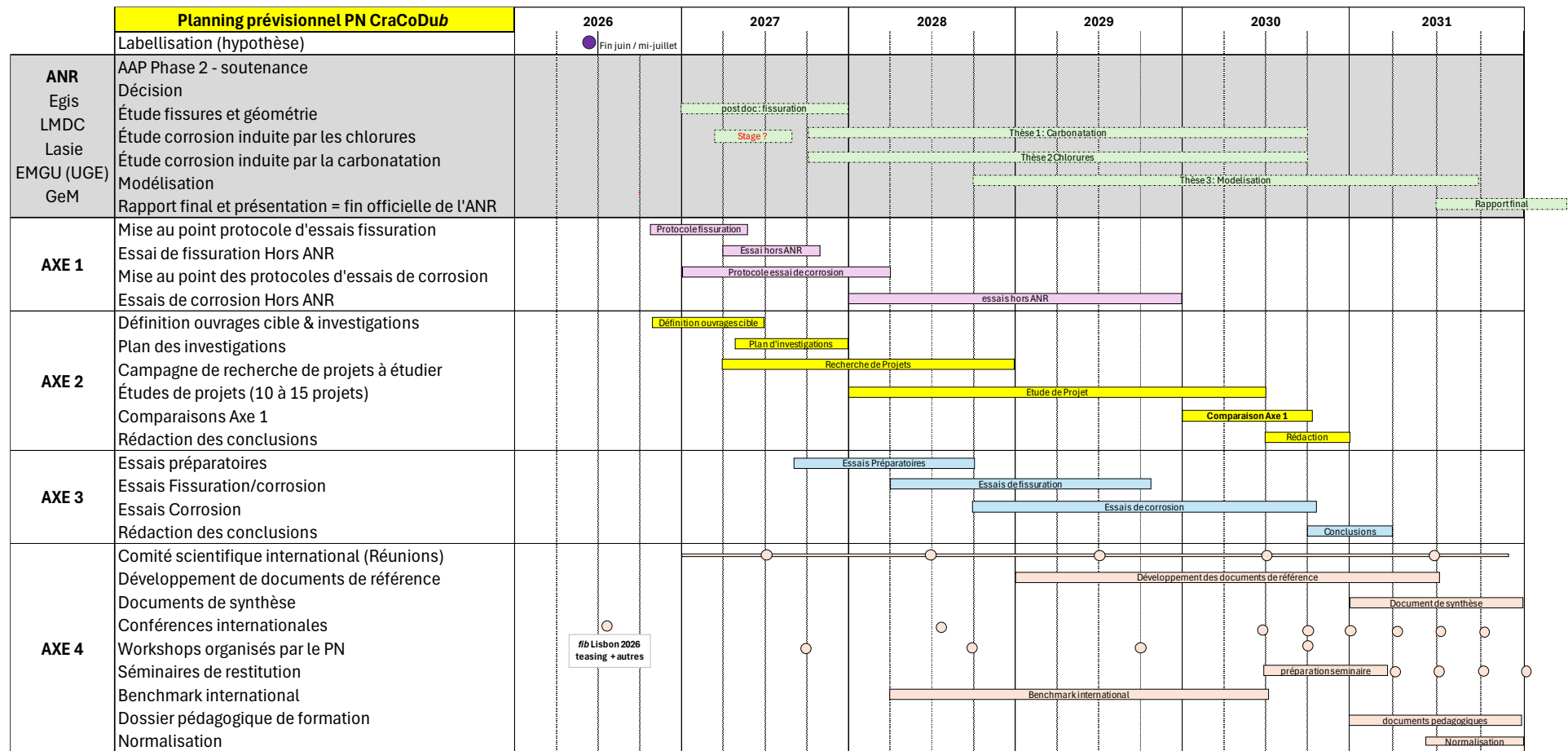
- **Alejandro Perez Caldentey**, professeur au département de mécanique des milieux continus et théorie des structures à l'université Politécnica de Madrid (Espagne), membre et animateur de la *fib* T 2.1, membre du CEN TC250/SC2 et directeur au sein de l'ingénierie Fhecor.
- **Maurizio Taliano**, professeur associé au département ingénierie des structures, construction et mécanique des sols à l'université Politecnico de Torino (Italie), membre de la *fib* T 2.1.
- **Richard Gagné**, professeur au département de génie civil et de génie du bâtiment de l'université de Sherbrooke (Canada, Québec), directeur du regroupement francophone pour la formation et la recherche sur le béton (RF2B), groupement de 11 laboratoires de recherche, spécialiste de la durabilité du béton et de la cicatrisation des fissures.

Les trois experts ont donné un accord de principe pour participer au CSI.

4.3 Planning prévisionnel du Projet National

Le planning prévisionnel est le suivant :

Figure 8 : planning prévisionnel du projet CraCoDub



4.4 Budget prévisionnel

Sur la base du programme d'actions envisagé décrit précédemment (§3), un budget prévisionnel du projet CraCoDub a été estimé. Il est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 9 : Budget prévisionnel du projet CraCoDub par axe de travail

Axe 1 : Etudes de laboratoire	€
Pilotage et copilotage axe 1	30 000
Mise au point protocole fissuration	45 000
Campagne d'essais labo Prisme mono fissuré - Etude fissuration	80 000
Campagne d'essais labo poutrelles multi fissurées - Etude fissuration	80 000
Modélisation fissuration	90 000
Campagne d'essais labo Prisme mono fissuré - Etude corrosion	100 000
Campagne d'essais labo poutrelles multi fissurées - Etude corrosion	100 000
Modélisation fissuration/propagation corrosion	320 000
Essais complémentaires config non étudiées ANR - Etude fissuration	120 000
Essais complémentaires config non étudiées ANR - Etude Corrosion	180 000
Essais / Comparaison avec résultats axe 2	100 000
Modélisation complémentaire	110 000
Rédaction de livrables	50 000
Total Axe 1	1 465 000
Axe 2 : Etudes in situ	
Pilotage et copilotage axe 2	30 000
Définition des objectifs - préparation contrat client	30 000
Participation à la mise au point du protocole de fissuration (action 2.3.1)	7 500
Définition du plan expérimental type	20 000
Contact avec Maitres d'ouvrages	45 000
Etape 0 : Présélection des sites, étude des données existantes (Hyp. 22 ouvrages)	73 500
Etape 1 investigations préliminaires sur site & essai laboratoire (Hyp. 15 ouvrages)	
Contractualisation	25 000
Examen site + essai labo (Hyp. 15 ouvrages)	207 000
Finalisation plan expérimental spécifique	22 000
Etape 2 : Prélèvements sur zone fissurée et analyse laboratoire (Hyp. 10 ouvrages)	340 000
Synthèses générale et rédaction livrable axe 2	30 000
Total Axe 2	830 000
Axe 3 Etude de solutions préventives et curatives	
Pilotage & copilotage axe 3	30 000
Participation à la mise au point du protocole de fissuration	7 500
Participation à la mise au point du protocole de corrosion	7 500
Investissement matériel pour essais	
Coffrages poutres (4 u, bois), injection, découpe pour analyse	10 000
Bâtis d'essais pour fissuration et maintien effort dans chambres (pour 28 unités)	40 000
Chambres climatiques (6 u, capacité 4 poutres unitaire, 3 carbo et 3 chlorures)	60 000
Multimètres multivoies pour suivi mesures courant (18 cartes)	15 000

Etudes (fabrication, essais, autopsie, interprétation)	
Essais Préliminaires & formulation produits	65 000
Fissuration seule (hypothèses 8 études sur 4 poutres = 32 poutres)	170 000
Fissuration/corrosion chlorures (4 poutres x 3 études x 18 mois d'essais)	180 000
Fissuration/corrosion carbonatation (sur 4 poutres x 3 études x 18 mois d'essais)	180 000
Rédaction livrable : Rapports préconisations & étude technico-économiques	30 000
Total Axe 3	795 000
Axe 4 : Dissémination et internationalisation	
Pilotage & copilotage axe 4	30 000
Comité Scientifique International (frais de déplacements, suivi, rédaction de CR...)	56 500
Articles conférence	90 000
Séminaires & journées de restitution	47 000
Support de cours & communication	24 000
Benchmark modélisation	102 000
Rédaction de proposition de modification de code	40 000
Site internet du PN CraCoDub	10 000
Total Axe 4	399 500
Pilotage du projet	
Pilotage par le Président, Directeur technique, Directeur Scientifique, frais de Secrétariat, frais de gestion IREX, frais divers associés à l'organisation des AG/CST	600 000
Total PN CraCoDub (Hors ANR) (€ HT)	4 089 500

Un projet ANR intitulé "BETTER Dub" a été déposé fin mars 2026 par un consortium réduit impliqué dans le montage du projet CraCoDub afin de financer des actions de recherche qui alimenteront le programme de l'Axe 1. En intégrant le budget de ce projet ANR (700k€HT), le budget total du projet CraCoDub atteint 4789k€HT. La répartition du budget prévisionnel par axe de travail est présentée dans la Figure ci-après :

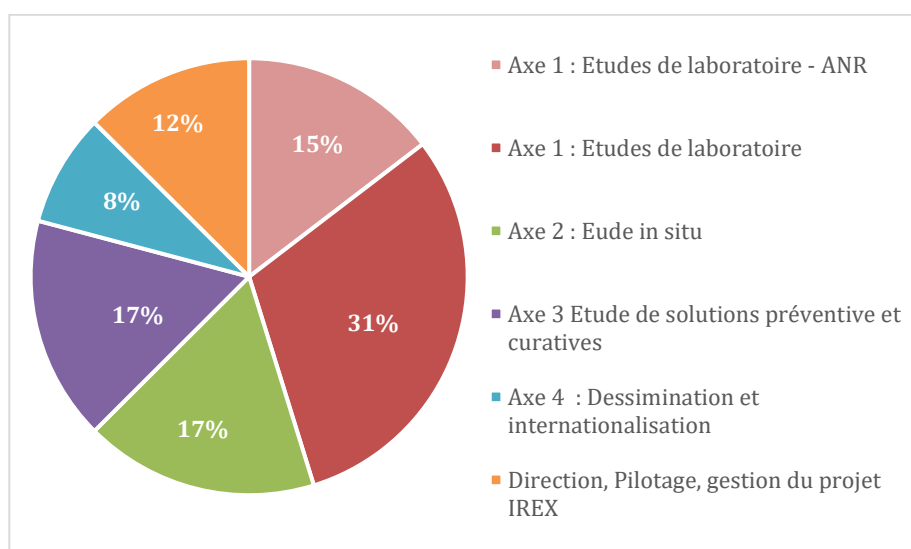


Figure 12. Répartition du Budget prévisionnel du PN CraCoDub + ANR par axe de travail

Plan de Financement

Le programme d'actions du projet sera financé via les apports en nature des partenaires potentiels, leurs cotisations, les subventions prévues (ANR, SRI du CGDD, FEREC) et des apports exceptionnels. Le plan de financement est résumé dans le tableau suivant :

Tableau 10. Plan de financement du PN CraCoDub + ANR

Ressources	Montant (€HT)
Apports en Nature	2 701 852
Cotisations des partenaires	1 200 000
Subvention ANR	700 000
Subventions SRI du CGDD et FEREC	160 000
Apports exceptionnels	27 648
Budget TOTAL	4 789 500

La répartition des ressources de financement est représentée dans la Figure suivante.

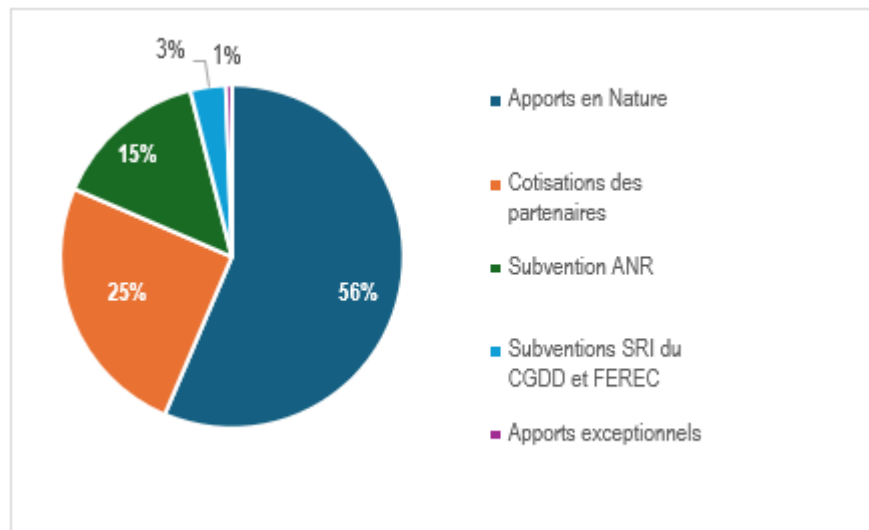


Figure 13. Répartition des ressources dans le plan de financement du PN CraCoDub

4.5 Analyses de risques

Tableau 11 : Tableau d'analyse des risques

ID	Domaine	Description du risque	Evaluation			Mesures de limitation	KPI
			Prob	Impa	Critic		
1a	Montage	Ne pas réunir suffisamment de partenaires pour financer le projet	2	3	6	Diffuser l'information sur le PN et relancer les partenaires potentiels	Nb de partenaire ayant signé la convention
1b		Ne pas obtenir l'ANR	3	3	9	Dossier déposé - Labélisation INFRA 2050 obtenue réponse attendue fin juin Possibilité de faire nouvelle candidature 12 mois plus tard.	validation ANR obtenue ou non
1c		Trainer à boucler le montage	2	2	4	Objectif organiser l'assemblée générale constitutive en Septembre/tout début octobre avant le bouclage des Budgets R&D de l'année 2027 dans les entreprises	Nombre d'action signée à fin 2026
1d		Projet NON labellisé = retards	2	2	4	Soins dans le montage du dossier ANR	Projet Labelisé: OUI/NON
2a	Axe 1	Problème de reproductibilité/dispersion des essais de fissuration et/ou de corrosion ne permettant pas de tirer de conclusions générales ou de faire un modèle prédictif.	3	2	6	Mise en place d'une stratégie de réflexion amont pluridisciplinaire afin de définir des protocoles d'essais adaptés sur la base d'un compromis entre reproductibilité, représentativité et coût) Standardisation stricte des protocoles expérimentaux depuis la préparation des spécimens jusqu'aux conditions d'essais et l'instrumentation Deux échelles de spécimens (décimétrique, métrique) prévues. L'échelle décimétrique permettra de multiplier les essais afin de s'assurer de la reproductibilité et faciliter les autopsies	Suivi des résultats
3a	Axe 2	Ne pas trouver suffisamment d'ouvrage correspondant aux critères attendus à examiner	2	2	4	Bien définir les besoins, préparer des plans d'action décrivant la nature des intervention et les retombées attendues des investigations et les diffuser largement aux maîtres d'ouvrages. Prise de contact avec de nombreux maîtres d'ouvrages	Nb d'ouvrages Ciblés (Objectif ~ 20/25) Nb d'ouvrage étudiés (Objectif ~ 10/15)
3b		Ne pas trouver de corrélation entre mesures in situ et labo	2	2	4	Réflexions amont sur la compatibilité des investigation et essais réalisés post mortem sur les éprouvettes des axe 1 et celles prélevées dans le cadre de l'axe 2	Suivi et analyse des résultats
4a	Axe 3	Manque de partenaires industriel producteurs et fournisseur d'adjuvants pour s'impliquer dans des actions particulières.	2	1	2	Faire participer les fournisseur dès le début aux réflexions sur la mise au point des essais notamment de fissuration.	Nb d'action signées
5a	Axe 4	Ne pas avoir suffisamment de résultats probants à communiquer pour modifier les codes	2	1	2	Il est prévu Beaucoup d'essais de laboratoire pour pouvoir accéder a des résultats probants	Nb d'article en revue internationale
5b		Acceptabilité des résultats en normalisation :	2	3	6	Prévoir une présentation des objectifs du PN en début de projets a la commission BNTRA/CN/EC2 + prévoir une presentation annuelle de l'avancement du projet à cette commission.	-
5c		Ne pas lancer le benchmark international (faute de participant ou de résultat probant par exemple)	1	2	2	Communication teasing amont sur le sujet au niveau international (papier fib Lisbon 2026 sera présenté en Juin + autre présentation en France et à l'international (TINCE = technical innovation in Nuclear engineering ou ECEE...))	Benchmark fait /non fait
5d		Rater l'internationalisation en étant trop franco-français	1	2	2	Mise en œuvre d'un comité international	Existence du Comité Scientifique International
6a	Pilotage du projet	Dérive budgétaire	2	3	6	Budget détaillé et outils de suivi du budget a mettre en œuvre. et adaptation des ambitions aux budgets	Nombre d'action signées avancement Action/budget action
6b		Dérive du planning	3	2	6	Financement Ferec demandé pour lancer rapidement la mise au point de l'essais d'analyse des faciès 3D	Financement FEREC obtenu OUI/NON

5 ANNEXES

5.1 ANNEXE 1 – Fiches de familles de produits pouvant être tester dans le cadre de l’Axe 3

5.1.1 Agents limitant le retrait – PCI

- Polymères super absorbants (SAPs). Ex : Polyacrylates, copolymères acrylamide/acrylate

Action : Les polymères super absorbants (SAPs) agissent par absorption osmotique de l’eau libre durant le malaxage, puis relarguent cette eau au cours de l’hydratation du ciment, réduisant ainsi le retrait autogène. Les SAP pré-humidifiés fonctionnent comme réservoirs internes, libérant progressivement l’eau par capillarité et diffusion, stabilisant l’humidité interne du béton.

Effet : Réduction du retrait autogène, contrôle de l’humidité interne

Limites : Peut affecter la rhéologie, dosage critique

Compatibilité : Bonne compatibilité avec plastifiants et retardateurs

Impact durabilité : Réduction de la fissuration → meilleure durabilité, barrière à la corrosion

Dosage : NC

Emploi : Ajout au malaxage sous forme solide

Rhéologie : Peut réduire la fluidité

R_c : Légère baisse initiale, compensée à long terme

Durabilité de l’effet : très Bonne

Coût : ++/+++

Impact CO₂ : Faible

Agents limitant le retrait - Tensioactifs (SRA)

- Alcools polyhydriques : Par exemple Propylène glycol, éthylène glycol

Action : Les tensioactifs réduisent la tension interfaciale entre les pores capillaires et l’eau, diminuant la pression capillaire responsable du retrait. Les polyalkylène glycols modifient la distribution de l’eau dans la matrice cimentaire, améliorant la compacité et réduisant les gradients de pression interne.

Effet : Facile à doser, effet immédiat

Limites : Effet limité dans bétons très performants

Compatibilité : Compatible avec plastifiants et retardateurs

Impact durabilité : Réduction du retrait capillaire → moins de fissures → meilleure protection contre la corrosion

Dosage : Généralement, de 0,5 à 2,0 % du poids de ciment

Mode Emploi : Ajout liquide au malaxage

Rhéologie : Peut réduire la fluidité

Résistance à la compression : Peu d’impact

Durabilité : Bonne

Coût : +

Impact CO₂ : Faible

- Esters/Éthers de polyalkylène glycols. Ex : Polyéthers modifiés

Action : Les tensioactifs réduisent la tension interfaciale entre les pores capillaires et l'eau, diminuant la pression capillaire responsable du retrait. Les polyalkylène glycols modifient la distribution de l'eau dans la matrice cimentaire, améliorant la compacité et réduisant les gradients de pression interne.

Effet : Bonne efficacité dans bétons à faible E/C

Limites : Sensibilité à la température

Compatibilité : Bonne compatibilité avec adjuvants chimiques

Impact durabilité : Réduction du retrait et amélioration de la compacité → meilleure durabilité

Dosage : Généralement, de 0,5 à 2,0 % du poids de ciment

Mode Emploi : Ajout liquide au malaxage

Rhéologie : Peut réduire la fluidité

Rc : Neutre à légèrement positif

Durabilité de l'effet : Bonne

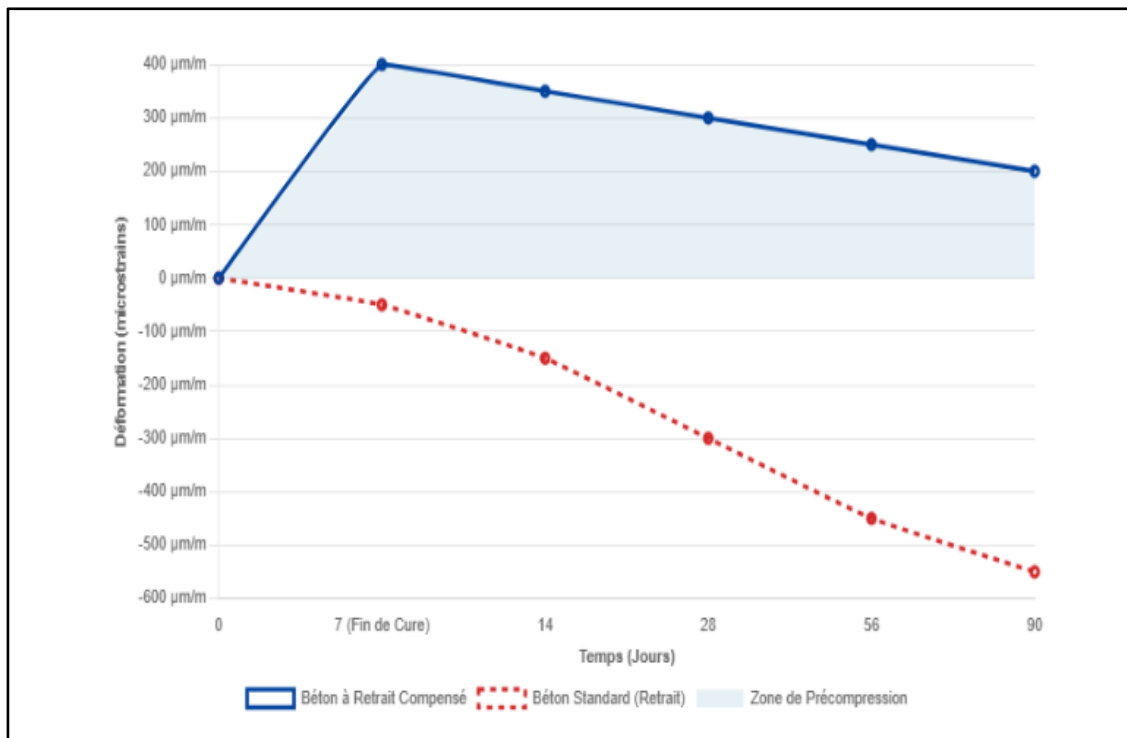
Coût : ++

Impact CO₂ : Faible

5.1.2 Agents Compensateurs de Retrait (ACR) au projet CraCoDub

- ACR à base de chaux et/ou de sulfoaluminate de calcium

Action : L'intégration d'ACR pour produire du béton à retrait compensé constitue une solution de rupture. Au lieu de contrôler les fissures existantes avec plus d'acier, le béton à retrait compensé agit en prévention, réduisant ou même annulant la cause principale de la fissuration précoce : le retrait volumique du béton. >Les ACR à base de chaux et/ou de sulfoaluminate de calcium agissent selon le mécanisme de la Pression de cristallisation de l'Ettringite Précoce.



Chimie : L'ACR augmente la concentration en ions calcium et hydroxydes de la solution porale du béton, ce qui accroît la pression de cristallisation de l'ettringite, induisant une expansion contrôlée du béton durant les premiers jours. La quantité d'ettringite formée peut-être la même que celle du béton sans Agents Compensateurs de Retrait, ou légèrement supérieure (cas des ACR contenant des sulfoaluminate de calcium). Une cure humide initiale est recommandée pour maximiser l'expansion.

Physique : L'expansion volumique est contrariée par les armatures ce qui met le béton en compression. La compression initiale s'oppose aux futures contraintes de traction dues au retrait de séchage, éliminant la fissuration liée aux effets jeune âge. La légère précontrainte résiduelle obtenue peut aussi contribuer à limiter l'ouverture des fissures à chargement mécanique extérieur égal.

Dosage des ACR : le dosage est crucial pour garantir une expansion suffisante sans être délétère. Il est exprimé en pourcentage de la masse du ciment, la fourchette typique se situe dans la plage 5 % à 10 % en substitution du poids du ciment, pour une expansion finale de 100 à 300 microstrain. Le dosage exact dépend du type de ciment utilisé (teneur en aluminates et sulfates), du rapport E/L, et de l'amplitude de compensation visée (compensation partielle ou totale).

Impact des ACR sur l'ouvrabilité et la résistance mécanique à la compression : l'utilisation des ACR est en général neutre sur l'ouvrabilité et les résistances mécaniques du béton

Impact des ACR sur la durabilité : l'intérêt premier des ACR est l'absence ou la réduction de l'ouverture des fissures avec un effet positif évident sur la durabilité par réduction de la pénétration de l'eau, du CO₂ ou des ions chlorures. Comme pour les bétons sans ACR, une cure thermique initiale dépassant les 65°C est à proscrire pour éviter les risques de formation d'ettringite différée. Ce risque va décroître avec la décarbonatation des formules béton grâce à la réduction du taux de clinker. Il est à noter que la réaction des ACR n'induit pas d'augmentation de l'échauffement durant la cure du béton.

Impact des ACR sur la maintenance des ouvrages : une réduction de la fissuration précoce signifie moins de réparations nécessaires au cours des premières années de service (l'âge où la plupart des microfissures s'ouvrent).

Impact financier : L'utilisation d'ACR entraîne un surcoût initial, mais pourrait générer des économies substantielles de deux façons : 1) réduction de la quantité d'armatures au moment de la construction ; 2) réduction de la maintenance de l'ouvrage en raison d'une moindre pénétration des agents agressifs. Le Thème 4 de l'Axe 3 vise à quantifier les gains économiques de cette approche.

Impact CO₂ : L'empreinte CO₂ des agents compensateurs de retrait est du même ordre de grandeur que celle d'un CEM I, ce qui conduit à une empreinte des bétons à retrait compensé similaire à celle des bétons sans ACR. Cependant, l'empreinte CO₂ des ouvrages à base de BRC pourrait être plus faible grâce à la réduction du dosage en armatures métalliques pour une durée de vie identique : le poids carbone des armatures varie entre 500 et 2000 kg CO₂/t d'acier selon la filière de production (recyclage ferraille en four électrique ou hauts fourneaux).

Quelques références :

ÉTUDE DE LA ROBUSTESSE, DE L'ADHÉRENCE ET DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS DE RÉPARATION À RETRAIT COMPENSÉ (2012)

Nouveaux essais de caractérisation du comportement volumétrique des bétons à retrait compensé (2020)

5.1.3 Agents cristallisants & cicatrisants

- Silicates cristallisants / silicate alcalins : Ex silicate de sodium, silicate de lithium, silicate de potassium

Action : Les silicates réactifs pénètrent dans les pores du béton et réagissent avec les produits d'hydratation du ciment pour former des cristaux insolubles qui colmatent les capillaires.

Effet : Favorise la cicatrisation des microfissures, réduction de la perméabilité

Limites : Sensibilité à l'humidité lors de l'application

Compatibilité : Compatible avec la plupart des adjuvants

Impact durabilité : Forte amélioration de la durabilité par colmatage des pores

Dosage :

Mode Emploi : Incorporation au malaxage ou pulvérisation en surface

Rhéologie : Peu d'impact

Rc : Neutre à légèrement positif

Durabilité de l'effet : très Bonne

Coût : ++

Impact CO₂ : Faible

- Phosphates modifiés ex : Acide phosphorique, phosphates organiques

Action : les phosphates modifiés précipitent en présence d'ions calcium, formant des cristaux dans les fissures fines, renforçant la barrière contre les agents agressifs.

Effet : Cicatrisation ciblée des fissures fines, effet retardé

Limites : Sensibilité au pH

Compatibilité : Compatible avec adjuvants organiques

Impact durabilité : Amélioration de la barrière aux chlorures

Dosage : non précisé

Mode Emploi : Incorporation au malaxage ou injection ciblée surface

Rhéologie : Peu d'impact

Rc : Peut ralentir légèrement le gain de résistance initiale

Durabilité : Bonne

Coût : ++/+++

Impact CO₂ : Faible

5.1.4 Agents cristallisants cicatrisants – CWA

- Agents cristallisants hydrophiles / Silicates modifiés. Ex ; Silicates réactifs (Silicate de sodium, silicate de lithium), Composés cimentaires modifiés, nanoparticules fonctionnalisées

Action : Les agents cristallisants hydrophiles réagissent avec l'eau et les produits hydratés du ciment pour générer des cristaux insolubles (principalement silicates de calcium hydratés) qui colmatent les pores et microfissures jusqu'à 0,5 mm, assurant une auto-cicatrisation durable. Les silicates modifiés pénètrent dans la matrice cimentaire et réagissent avec les produits hydratés pour densifier la structure par précipitation secondaire, réduisant la porosité et augmentant la compacité autour des armatures. Les silicates alcalins (sels solubles de l'acide silicique) réagissent avec la chaux pour former des gels de silice. Réaction également avec le CO₂ pour former gel de silice insoluble qui renforce la matrice.

Effet : Réduction durable de la perméabilité ; Auto-cicatrisation des microfissures ; Amélioration de la durabilité globale Amélioration de la compacité, réduction de la porosité, création d'une barrière semi-perméable, effet respirant en laissant passer la vapeur d'eau Densification de la matrice et diminution de la fissuration à long terme

Limites : Efficacité dépendante de la présence d'humidité ; Nécessite un environnement alcalin ; Effet limité sur fissures larges, risques d'efflorescences.

Compatibilité : Bonne compatibilité avec la plupart des adjuvants classiques ; à tester avec agents hydrophobes

Impact durabilité : Amélioration significative de la durabilité ; Barrière interne contre les agents agressifs

Dosage : non spécifié

Mode Emploi : Incorporation au malaxage ou pulvérisation en surface

Rhéologie : Peu d'impact ; formulation adaptée pour limiter l'effet sur la rhéologie

Rc : Neutre à légèrement positif

Durabilité : très Bonne effet prolongé

Coût : ++/+++

Impact CO₂ : Faible

5.1.5 Agents cristallisants cicatrisants colloïdaux

- Silices colloïdales, alumines colloïdales. Ex : silice colloïdale stabilisée, alumine colloïdale

Action : Les silices et alumines colloïdales, sous forme de nanoparticules stabilisées, se dispersent dans la matrice cimentaire et réagissent avec les hydrates de calcium pour densifier la structure par effet pouzzolanique et colmatage physique des pores.

Effet : Amélioration de la compacité, réduction de la perméabilité, effet pouzzolanique

Limites : Sensibilité au pH et à la concentration ionique, coût élevé

Compatibilité : Bonne compatibilité avec superplastifiants et retardateurs

Impact durabilité : Réduction de la porosité → meilleure protection des armatures

Dosage : non spécifié

Mode Emploi : Ajout liquide au malaxage

Rhéologie : Peu d'impact

Rc : Amélioration à long terme

Durabilité : très Bonne

Coût : +++

Impact CO₂ : Faible

5.1.6 Inhibiteurs de corrosion en masse

- Nitrites alcalins. Ex : Nitrite de sodium, nitrite de calcium

Action : Les nitrites alcalins oxydent les ions fer Fe^{2+} en Fe^{3+} , favorisant la formation d'une couche passive de Fe_2O_3 sur l'acier, au lieu de former des chlorures de fer solubles. Les nitrites alcalins vont également augmenter le rapport $[NO_2^-] / [Cl^-]$ à la surface de l'acier ce qui va diminuer la vitesse de corrosion de l'acier. Ils vont maintenir un pH basique dans le béton, permettant de préserver la passivation des armatures.

Effet : Efficace contre corrosion induite par chlorures, action rapide, maintien la passivation

Limites : Dosage critique (Trop faible = inefficace, trop élevé = risque de retard de prise), risque de toxicité

Compatibilité : Compatible avec superplastifiants

Impact durabilité : Réduction significative du taux de corrosion

Dosage : Non Spécifié

Mode Emploi : Ajout liquide au malaxage

Rhéologie : Peu d'impact

Rc : Peut ralentir légèrement l'hydratation, risque de retard de prise si dosage élevé

Durabilité : Bonne

Coût : ++/+++

Impact CO₂ : Faible

- Amines organiques, carboxylates : ex Benzotriazole, alkanolamines

Action : Les amines organiques s'adsorbent sur la surface métallique, créant un film hydrophobe qui limite l'accès des ions chlorure et de l'humidité. Ces molécules sont amphiphiles avec une partie polaire (affinité avec l'acier) et une partie apolaire (hydrophobe).

Effet : Protection multi-mécanismes, faible impact sur rhéologie, réduction de la diffusion des Cl^- et O_2 vers l'acier, maintien la passivation en limitant les réactions anodiques et cathodiques

Limites : Dépend de la diffusion dans la matrice

Compatibilité : Compatible avec superplastifiants
Impact durabilité : Barrière chimique contre les ions agressifs
Dosage : non spécifié
Mode Emploi : Ajout liquide au malaxage
Rhéologie : Aucun
Rc : Neutre
Durabilité : Bonne en milieu alcalin
Coût : ++
Impact CO₂ : Faible

5.1.7 Hydrofuges de masse (composés organiques)

- Acides gras / Sels d'acides gras : ex : composés organiques de type acide carboxylique avec une longue chaîne hydrocarbonée mais souvent utilisés dans le béton sous forme de sels métalliques : Stéarate de sodium, oléate de sodium, stéarate d'aluminium

Action : Les acides gras utilisés dans les hydrofuges de masse agissent principalement en modifiant la tension superficielle et en créant une barrière hydrophobe dans la matrice du béton. Réaction avec la chaux : formation de composés hydrophobes insolubles. Formation d'une barrière hydrophobe : diminution de la tension superficielle en tapissant les parois capillaires, ce qui va empêcher l'eau liquide de s'évaporer ou de pénétrer par capillarité. Laisse passer l'eau sous forme vapeur.

Les acides gras ou leurs sels réagissent avec la chaux pour former des composés hydrophobes insolubles

Effet : Effet hydrofuge durable, réduction de l'absorption capillaire, diminution de l'apparition de fissures, réduction de la porosité

Limites : Efficacité dépendante du rapport E/C, sensible au surdosage (diminution des résistances mécaniques), risque d'efflorescence, Effet limité en profondeur, effet plus marqué en surface, Pas d'effet sur la cicatrisation des fissures sur le long terme

Compatibilité : Compatible avec la plupart des adjuvants, vérifier compatibilité avant essai

Impact durabilité : Réduction de la pénétration d'eau → meilleure durabilité

Dosage : non spécifié

Mode Emploi : Incorporation au malaxage ou pulvérisation en surface

Rhéologie : Peut augmenter la viscosité

Rc : Neutre à légèrement positif

Durabilité : très Bonne

Coût : ++

Impact CO₂ : Faible

- Silanes et Siloxanes. Ex : Alkyltrialkoxysilanes, siloxanes

Action : Les silanes/siloxanes s'hydrolysent et se condensent avec les silicates de la pâte cimentaire, créant une barrière hydrophobe à l'intérieur de la matrice.

Effet : Très bonne résistance à l'eau

Limites : Effet limité en cas de fissures ouvertes

Compatibilité : Compatible avec adjuvants minéraux

Impact durabilité : Amélioration de la résistance à la pénétration des agents agressifs

Dosage : Non Spécifié

Mode Emploi : Ajout liquide au malaxage

Rhéologie : Peu d'impact Rc : Neutre

Durabilité : très Bonne

Coût : ++

Impact CO₂ : Faible

Normes associées :

NF-EN-934-2+A1- Aout 2012 « *Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage* ». Voir chapitre 9 : Exigences complémentaires pour hydrofuges de masse.

5.1.8 Hydrofuges de surface : Imprégnations hydrophobes non filmogène

- Silanes et Siloxanes. Ex : Alkyle éthoxy ou méthoxy silane, alkyl polysiloxane.

Action : Silanes : molécules très fines, forte pénétration, excellente hydrophobie pour infrastructures fortement exposées. Siloxanes : polymères plus gros, pénétration moindre mais bonne efficacité et coût modéré.

Effet : Silanes : Très bonne efficacité, particulièrement sur bétons peu carbonatés et structures exposées aux sels de déverglaçage. Utilisés dans les ouvrages d'infrastructure (ponts, tabliers, génie civil). Siloxanes : bon compromis coût / efficacité, adaptés aux bétons plus ouverts ou aux maçonneries. Hydrophobisation : les molécules réagissent avec les groupes hydroxyles du béton et rendent les pores non mouillables, tout en permettant à la vapeur de diffuser. L'effet perlant peut disparaître dans le temps, contrairement à la réduction de l'absorption capillaire qui est pérenne, ce qui permet de conserver de bonnes performances sur de longues périodes.

Limites : Durée de vie limitée : Silanes : 5 - 15 ans Siloxanes : 3 - 10 ans les hydrofuges n'arrêtent pas une corrosion active.

Compatibilité : sans objet

Impact durabilité : Réduction de l'humidité et de la pénétration des chlorures et autres agents agressifs dans le béton. Limitation des cycles de gel/dégel et de l'encrassement. Préservation de l'aspect pour les hydrofuges non filmogènes. Mesure préventive peu coûteuse et simple et rapide à mettre en œuvre.

Dosage : sans objet

Mode Emploi :

- Support propre, sec, sans laitance ni pollution (graisses, efflorescences, poussières).
- Application par pulvérisation basse pression, rouleau ou brosse, souvent en une ou deux passes jusqu'à saturation.
- Température généralement recommandée : +5 à +30°C, éviter pluie et vent fort.
- Le béton doit être suffisamment sec pour éviter d'emprisonner l'humidité (risque critique pour les produits filmogènes).
- Temps de polymérisation : de quelques heures à 24 h selon le produit.

Rhéologie : Sans objet

Rc : sans objet

Durabilité : Moyen

Coût : +/++

Impact CO₂ : Faible

Normes Associées : EN1504 – 2 : Systèmes de protection de surface pour béton

- Silicates (lithium, sodium, potassium). Ex : Ethyl silicates.

Action : Densification de surface, action hydrofuge limitée. Obstruction partielle des pores : réaction chimique formant des produits insolubles (gel de silice) réduisant la porosité capillaire.

Effet : Réduction de la porosité capillaire.

Limites : Plus proche d'un traitement de durcissement que d'un véritable hydrofuge. Efficacité hydrophobe limitée. Les hydrofuges n'arrêtent pas une corrosion active.

Compatibilité : Sans Objet

Impact durabilité : Idem Siloxane

Dosage : sans objet

Mode Emploi : Idem siloxanes

Rhéologie : Sans Objet

Rc : Sans Objet

Durabilité : non précisée

Coût : ++

Impact CO₂ : Faible

Normes Associées : EN1504 – 2 : Systèmes de protection de surface pour béton

5.1.9 Protection Cathodique par courants imposés

Action : la protection cathodique des armatures par courants imposés permet de protéger les armatures contre la corrosion en leur imposant d'être la partie cathodique d'un circuit constitué de l'armature connectée à un générateur connecté à une anode en titane. Le circuit étant fermé par la solution interstitielle du béton ou par l'eau si celui-ci est plongé dans un liquide conducteur. Il s'agit d'une méthode efficace, éprouvée faisant l'objet d'une normalisation.

La protection cathodique peut être mise en œuvre en préventif (faibles courants imposés) ou en curatif (courants imposés beaucoup plus importants)

Effet : protection efficace des armatures au voisinage de l'anode contre la corrosion tant que le courant imposé est actif, même dans du béton fortement contaminé aux chlorures.

Limites : ce procédé est relativement coûteux et délicat à mettre en œuvre. S'agissant d'un processus actif, il nécessite un apport d'énergie, une maintenance et un monitoring sur la durée de vie résiduelle de l'ouvrage. En outre, la polarisation contribue à accélérer la pénétration des chlorures dans l'épaisseur de l'enrobage jusqu'à l'anode titane. Il faut donc éviter d'installer une protection sur un ouvrage neuf qui fonctionne pendant une ou deux décennies puis qui n'est plus entretenue et stoppée.

Compatibilité : Sans Objet

Impact sur la durabilité : très efficace

Dosage : Sans Objet

Mode Emploi : N/C

Rhéologie : Sans Objet

Rc : Sans Objet

Durabilité : ++ nécessite une maintenance et une surveillance

Coût : +++

Impact CO₂ : A évaluer

Normes Associées : NF EN ISO 12696 « *Protection cathodique des armatures dans le béton* »

EN 1504 - Principe 11 Contrôle cathodique

5.1.10 Injection de fissure

Il s'agit d'une méthode de référence qui est couramment utilisée pour la réparation de fissures dépassant les ouvertures admissibles.

Action : L'injection consiste à colmater le bord de la fissure puis la remplir la fissure en injectant par gravité ou sous pression par un matériau liquide qui, en durcissant, va adhérer au béton et étancher la fissure.

Effet : L'injection prévient la pénétration d'eau ou d'agents agressifs par la fissure reconstituant ainsi l'efficacité du béton d'enrobage. Selon la nature du produit utilisé pour l'injection (liant hydraulique, résine rigide ou résine souple) le produit d'injection peut aussi contribuer à reconstituer la continuité mécanique du matériau au niveau de la fissure.

Limites : Difficulté d'injecter en profondeur les fissures fines (<0.2mm), esthétique de surface, travaux nécessitant une main d'œuvre qualifiée et une bonne qualité de mise en œuvre. Possibilité de réouverture des fissures si les sollicitations augmentent par exemple sous l'effet de chargement, retrait, fluage, tassements

Compatibilité : sans objet

Impact durabilité : Important, durable et démontré

Dosage : Sans objet

Mode Emploi :

Rhéologie : Sans Objet

Rc : Sans Objet

Durabilité : +++

Coût : +++

Impact CO₂ : A évaluer

Normes Associées : EN1504 – 5 « *Produits et système d'injection du béton* »

5.1.11 Fibres

- Ajout de fibres métallique dans le béton armé.

Action : Renforcement de la matrice béton par ancrage des fibres d'aciers.

Effet : Amélioration des caractéristiques post fissuration par augmentation de la résistance en traction grâce à l'action du réseau de fibres métalliques.

Limites : La performance mécanique est liée au dosage. Pour des questions pratiques la quantité de fibres que l'on peut mélanger reste limitée et donc les performances finales aussi. De plus les fibres ne constituent pas un renforcement "continu" il y a donc une variabilité des performances à prendre en compte ainsi que des problématiques de distribution dans la matrice.

Compatibilité : les fibres métalliques sont compatibles au même titre que tous les aciers de renforcement

Impact durabilité : L'effet de renforcement de la matrice béton combiné à des aciers traditionnels a un impact démontré sur la taille, la forme et la distribution de la fissuration. Il est possible d'optimiser les taux d'armatures traditionnels en utilisant le réseau de fibres métalliques tout en facilitant la production des microfissurations qui sont souhaitables pour la durabilité.

Dosage : généralement entre 20 et 50 kg/m³ suivant le type de fibre et le type de béton sélectionné.

Mode Emploi : Incorporation possible en centrale à béton dans le malaxeur ou en camion toupie.

Rhéologie : Prévoir un ajustement de la formule béton lié une ouvrabilité généralement diminuée par l'ajout des fibres métalliques (superplastifiants, G/S, etc...)

Rc : Identique au béton blanc

Durabilité : Bonne

Coût : meilleur que aciers seuls à performance équivalentes

Impact CO₂ : meilleurs que aciers seuls à performances équivalentes

- Ajout de fibres synthétique dans le béton armé.

Pour mémoire

Action : principe similaire aux fibres aciers

5.1.12 Armatures présentant une résistance à la corrosion

- Armatures galvanisées

Il s'agit d'armatures revêtues d'une couche de zinc typiquement de 80 à 120 microns, appliquée le plus souvent par galvanisation à chaud

Action : Dans le béton la couche de zinc réagit avec l'hydroxyde de calcium pour former une couche adhérente stable et peu soluble qui agit comme une barrière protectrice sur les armatures.

Effet : vis-à-vis de la carbonatation - A PH 8-9 la couche initiale évolue en carbonate et hydroxycarbonate de zinc qui sont des produits peu expansifs, relativement protecteurs et peu adhérent. Ils ne conduisent pas à la fissuration du béton d'enrobage et ralentissent fortement la corrosion de la couche de zinc sous-jacente. La couche de zinc sacrificielle qui protège le béton se corrode donc très lentement.

Vis-à-vis des chlorures, le seuil critique de chlorure à partir duquel la couche passive est sensiblement plus élevée que pour l'acier standard (d'un facteur 2 à 5) ce qui retarde le moment de l'amorçage de la corrosion du zinc. Cette corrosion qui apporte une protection sacrificielle est beaucoup plus lente que celle de l'acier.

Limites : la protection est efficace et accroît significativement la durée de vie de la structure. Néanmoins cette protection est temporaire. Problème au niveau des coupes qui ne sont pas protégées. Sensibilité au choc de la couche de zinc pouvant nécessiter des retouches.

Compatibilité : Pas de problèmes de compatibilité avec le béton. N'a en théorie pas d'impact sur l'adhérence des armatures HA.

Impact durabilité : très significatif vis à vis de la carbonatation en ambiance XC, significatif en présence d'une quantité modérée de chlorures (XS1, XS2, XD1, XD2), moins efficace en milieu fortement chloruré (XS3, XD3)

Mode Emploi : en remplacement de tout ou partie des armatures standards

Rhéologie : sans objet

Rc : sans objet

Durabilité : excellente

Coût : ++/+++ coût matière plus élevé de 40 à 50% par rapport au coût de l'acier noir

Impact CO₂ : A évaluer

Normes Associées :

Il n'y a pas de norme spécifique aux aciers galvanisés. La partie acier est couverte par l'EN10080 et l'acier doit être B550B ou B500C. La galvanisation est un traitement complémentaire appliqué sur cet acier.

Ce traitement est couvert par les normes EN-ISO-1451 *revêtement par galvanisation à chaud*

L'EN1992-1-1 qui est la norme de référence pour le béton armé ne distingue pas les types d'armatures. Ainsi ces armatures sont compatibles, leur usage est autorisé mais elles ne sont pas explicitement décrites et leurs propriétés spécifiques vis-à-vis de la corrosion ne sont par conséquent pas prises en compte.

- Acier MMFX/MMX

Action : il s'agit d'aciers non revêtus à microstructure martensitique composite (Martensitic Microcomposite Formable Steel) contenant une faible teneur en chrome (typiquement de 0.6 à 1.5%). Ils présentent une haute résistance mécanique, une bonne ductilité et une bonne résistance intrinsèque à la corrosion dans le béton ce qui leur permet de résister aux classe XC, XD et XS modérées. Ils présentent en outre une limite élastique de 690 Mpa pour le grade 100 et 830 Mpa pour le grade 130.

Effet : La résistance intrinsèque des aciers MMX à la corrosion leur permet de supporter des PH faibles et des seuils de chlorure 2 à 3 fois plus élevés que le l'acier d'armature standard ce qui améliore grandement leur durabilité dans le béton. Ils peuvent ainsi théoriquement supporter des ouvertures de fissures plus importantes ce qui permet d'utiliser pleinement leurs caractéristiques mécaniques et conduit à un gain potentiel de quantité d'armature associé à une bonne durabilité.

Limites : cadre normatif européen limité et coût unitaire élevé,

Compatibilité : sans objet pour le béton, bonne soudabilité

Impact durabilité : permettrait des ouvertures de fissures significativement plus élevées à durabilité égale car les cinétiques de corrosion présenteraient une faible dépendance à l'ouverture de fissure.

Mode Emploi : Remplacement de tout ou partie des armatures standards

Rhéologie : sans objet

Rc : sans objet

Durabilité : excellente

Coût : cout matière plus élevés, typiquement + 20% à 35%

Impact CO₂ : A évaluer

Normes Associées : Les aciers MMFX/MMX ne sont pas explicitement décrits dans les normes Européennes et ne sont donc pas reconnus pour leur caractère d'acier faiblement alliés présentant un caractère « anticorrosion ». Ils sont néanmoins conformes aux exigences de l'EN 10080- *Aciers Soudables pour le béton armé* - et leurs performances satisfont la qualification B500B ou B500C. Ils sont donc utilisables en Europe. Ils sont définis dans les normes ASTM A1035 et A1035/M et sont reconnus par les ACI 138 et l'ASTHO pour les ponts.

- Armatures Inox

Action : il s'agit d'aciers alliés à forte teneur en chrome et le plus souvent associé à du Nickel et du Molybdène. La couche d'oxyde de chrome, est passive et autocatrisante ce qui confère à l'acier une excellente résistance intrinsèque à la corrosion le rendant insensible à la carbonatation et, pour certaines

nuances, à des niveaux très élevés de chlorures. En outre, ces aciers présentent une grande ductilité et, pour certaines nuances, des performances mécaniques élevées et une grande ductilité.

Effet : Durabilité indéfinie des armatures dans le béton et ce de façon quasi indépendante de la qualité, de l'épaisseur du béton d'enrobage et des ouvertures de fissures, à condition que le choix de la nuance soit compatible avec la classe d'exposition, typiquement : Inox austénitique 304 (1.4301) pour les classes d'exposition XC, Inox austénitiques 316/316L (1.4401/1.4404) pour les classes d'exposition XS1, XS2, XD1, XD2 et acier Duplex (1.4462) pour les très fortes agressivité (XS3 XA3) et autres agressions chimiques.

Limites : Coût unitaire très élevé, impact carbone significatif, disponibilité du nickel et du chrome limitée.

Compatibilité : Contact possible avec les armatures standard dans le béton.

Impact durabilité : Maximal. Il s'agit probablement de la solution techniquement la plus efficace.

Mode Emploi : Remplacement d'une partie des armatures standards.

Rhéologie : sans objet

Rc : sans objet

Durabilité : indéfinie pour ce qui concerne les armatures.

Coût : ++++ : coût matière très x 4 à x 8 selon les cours des matières premières et la nuance retenue.

Impact CO₂ : A évaluer

Normes Associées : Idem Armatures galvanisées

5.2 ANNEXE 2 – Résumé ANR Better-dub

Le projet BETTER-Dub, en synergie avec le Projet National CraCoDub, vise à améliorer la durabilité des infrastructures en béton armé dans un contexte de décarbonation du secteur de la construction. La production de béton armé génère un fort impact carbone lié au ciment mais également à l'acier, d'où la nécessité d'optimiser les volumes d'armatures et de prolonger la durée d'utilisation des infrastructures. La fissuration du béton, naturellement liée à son fonctionnement mécanique, favorise la pénétration des agents agressifs (gaz carbonique et chlorures) provoquant à rapidement un amorçage de corrosion. Les normes actuelles imposent donc des limites d'ouverture de fissures en surface, conservatrices et pouvant entraîner une surconsommation d'acier sans gain avéré de durabilité. L'expérience montre que la mesure de ces ouvertures de fissures ne reflète pas fidèlement le risque de corrosion à l'interface acier-béton. Le lien entre fissures initiales et corrosion doit donc être mieux caractérisé pour établir des seuils d'ouvertures plus réalistes permettant d'optimiser la conception.

Le projet poursuit trois objectifs scientifiques : caractériser le faciès 3D des fissures existantes dans un élément de béton armé, étudier l'influence de leur morphologie sur le transfert des agents agressifs et la propagation de la corrosion, et mieux comprendre les mécanismes de corrosion à l'interface acier-béton en fond de fissure. Quatre Work Packages (WP) structurent la démarche : (WP1) caractérisation tridimensionnelle des fissures, (WP2) étude de la corrosion par les chlorures, (WP3) par la carbonatation et (WP4) développement de modèles prédictifs couplant fissuration, transferts et corrosion. Ces travaux, menés par un consortium académique (LMDC, LASIE, GeM, UGE) / Bureau d'ingénierie (EGIS), alimenteront une base de données scientifiques solide qui visera à faire évoluer les normes actuelles et proposer des seuils de fissuration afin d'améliorer la durabilité des ouvrages.

6 Références bibliographiques

- Ahmadi, B., Ramezani pour, A. A., Sobhani, J. 2014. Rebar corrosion in cracked RC prisms located in harsh marine environment. *Magazine of Concrete Research*, 66(19), 1007–1019. DOI: 10.1680/mac.14.00055.
- Alterman, D., Akita, H., Neitzert, T., Alterman, J. 2011. An impregnation technique for crack identification following uniaxial tension tests. *Advanced Materials Research*, 275, 51–54.
- Ammouche, A., Breyse, D., Hornain, H., Didry, O., Marchand, J. 2000. A new image analysis technique for the quantitative assessment of microcracks in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 30, 25–35.
- Amoozrezaei, K., Ghanbari-Ghazijahani, T. 2025. A comprehensive review: Self-healing methods and cementitious composites. *Structures*, 72. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.108038.
- Angst, U. M. et al. 2019. The effect of the steel–concrete interface on chloride-induced corrosion initiation in concrete: a critical review by RILEM TC 262-SCI. *Materials and Structures*, 52(4), 88. DOI: 10.1617/s11527-019-1387-0.
- Angst, U., Büchler, M. 2015. On the applicability of the Stern–Geary relationship to determine instantaneous corrosion rates in macro-cell corrosion. *Materials and Corrosion*, 66(10), 1017–1028.
- Araújo, M., Chatrabhuti, S., Gurdebeke, S., Alderete, N., Van Tittelboom, K., Raquez, J.-M., Cnudde, V., Van Vlierberghe, S., De Belie, N., Gruyaert, E. 2018. Poly(methyl methacrylate) capsules as an alternative to the proof-of-concept glass capsules used in self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 89. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.02.015.
- Arya, C., Ofori-Darko, F. K. 1996. Influence of crack frequency on reinforcement corrosion in concrete. *Cement and Concrete Research*, 26(3), 345–353. DOI: 10.1016/S0008-8846(96)85022-8.
- ASTM A. G71-81. 2014. Standard guide for conducting and evaluating galvanic corrosion tests in electrolytes.
- ASTM C1581-04. (2004). Standard test method for determining age of cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage (A. International (ed.)). West Conshohocken PA
- Bamforth, P. 1997. Probabilistic performance based durability design of concrete structures. In: *Management of Concrete Structures for Long-Term Serviceability*, Thomas Telford Publishing, p. 33–44.
- Beeby, A. 1978. Cracking: what are crack width limits for? *Concrete*, 12(7).
- Ben Fraj, A., Bonnet, S., Khelidj, A., 2012. New approach for coupled chloride/moisture transport in non-saturated concrete with and without slag, *Construction and Building Materials*, 35. doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.106
- Bernachy-Barbe, F., Sayari, T., Dewynter-Marty, V., L’Hostis, V. 2020. Using X-ray microtomography to study the initiation of chloride-induced reinforcement corrosion in cracked concrete, *Construction and Building Materials*, 259. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119574
- Berrocal, C. G., Löfgren, I., Lundgren, K., Tang, L. 2015. Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: Influence of crack width, fibre type and loading conditions. *Corrosion Science*, 98, 128–139. DOI: 10.1016/j.corsci.2015.05.021.
- Bertolini, L. 2004. *Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair*. Wiley-VCH.
- Bhargava, K., Ghosh, A. K., Mori, Y., Ramanujam, S. 2006. Analytical model for time to cover cracking in RC structures due to rebar corrosion. *Nuclear Engineering and Design*, 236, 1123–1139. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2005.10.011.
- Bi, M., Subramaniam, K. 2006. Corrosion of steel in cracked concrete: Experimental investigation. In: *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties: An International Symposium dedicated to Professor Surendra P. Shah*, Northwestern University, USA, Springer, p. 557–562.

- Blagojevic, A. 2016. The influence of cracks on the durability and service life of reinforced concrete structures in relation to chloride-induced corrosion: A look from a different perspective.
- Boschmann Kathler, A., Angst, U., Wagner, M., Larsen, C., Elsener, B. 2017. Effect of cracks on chloride- induced corrosion of steel in concrete - a review. *Int Corros Process* 41:1–23
- Borosnyoi-Crawley, D. 2025. Change of crack widths and anatomy of cracks within the cover of reinforced concrete tension members. *Construction and Building Materials*, 489, 142192.
- Borosnyói, A., Snóbli, I. 2010. Crack width variation within the concrete cover of reinforced concrete members. *Epitoanyag – Journal of Silicate Based Composite Materials*, 62(3), 70–74. DOI: 10.14382/epitoanyag-jsbcm.2010.14.
- Broms, B. B. 1965. Crack width and crack spacing in reinforced concrete members. In: *Journal Proceedings*, 1965, p. 1237–1256.
- Cai, Y. et al. 2020. Characteristics of the steel-concrete interface and their effect on the corrosion of steel bars in concrete. *Construction and Building Materials*, 253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119162.
- Carević, V., Ignjatović, I. 2019. Influence of loading cracks on the carbonation resistance of RC elements. *Construction and Building Materials*, 227, 116583. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.309.
- Chang, L.-Z., Thorsson, J. , Lundgren, K. 2024. 3D modelling of the interaction between bending and corrosion-induced cracks in reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 411
- Chauhan, A., Desai, Y. M., Banerjee, S., Sharma, U. K. 2023. 3D simulation of non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete exposed to real climate. *Structures*, 56, 104852. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.07.042.
- Chatterji, S., Thaulow, N., Christensen, P. 1981. *Cement and Concrete Research*, 11(1), 155–157.
- Chen, G., Tang, W., Chen, S., Ng, C., Cui, H. 2025. Prediction of self-healing ability of recurring cracks in engineered cementitious composites with a machine-learning-based computational approach. *Journal of Building Engineering*, 104. DOI: 10.1016/j.jobe.2025.112323.
- Cheng, H. S., Wang, S. J., Cao, G. X., Wei, M., Wang, T. 2003. The non-destructive detecting of inner cavity defect of concrete under steel plate lining of the runner chamber of hydro-power plant by using neutron method. *Journal of Isotopes*, 16, 138–142.
- Coppola, L. 1996. Corrosion of reinforcing steel in concrete structures submerged in seawater. *American Concrete Institute*, 163(5), 127–150.
- Cremona, C., Adélaide, L., Berthaud, Y., Bouteiller, V., L’hostis, V., et al. 2011. Probabilistic and predictive performance-based approach for assessing reinforced concrete structures lifetime: The applet project. *EPJ Web of Conferences*, 12 (01004), (10.1051/epjconf/20111201004). (cea-01272795)
- de Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N., Schlangen, E. 2013. Self-healing phenomena in cement-based materials: State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 221-SHC. Springer. DOI: 10.1007/978-94-007-6624-2.
- Djerbi, A., Bonnet, S., Khelidj, A., Baroghel-Bouny V., 2008. Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete, *Cement and Concrete Research*, 38, 877–883. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.007>
- Djerbi-Tegguer, A., Bonnet, S., Khelidj, A., Baroghel-Bouny V., 2013. Effect of uniaxial compressive loading on gas permeability and chloride diffusion coefficient of concrete and their relationship, *Cement and Concrete Research*, 52, 131–139. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.05.013>
- Du, X., Jin, L. 2014. Meso-scale numerical investigation on cracking of cover concrete induced by corrosion of reinforcing steel. *Engineering Failure Analysis*, 39, 21–33. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2014.01.011.
- Edvardsen, C. 1999. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, 96(4), 448–454.

- El Khoury, K., Vollum, R., Izzuddin, B., Forth, J. 2025. Experimental investigation into cracking in edge restrained concrete walls, *Engineering Structures*, 345, 121536
- Fabien, A., Choinska, M., Bonnet, S., Pertue, A., Khelidj, A., 2021. Aggregate size effects on the mechanical behaviour and on the gas permeability at damaged state of cement-based materials with and without slag, *Journal of Environmental and Civil Engineering*,. <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1915881>
- Fang, X., Pan, Z., Ma, R., Chen, A. 2023. A multi-phase-field framework for non-uniform corrosion and corrosion-induced cracking. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 414, 116196. DOI: 10.1016/j.cma.2023.11619.
- Fang, X., Pan, Z., Ma, R., Chen, A. 2023. Phase-field method for modeling non-uniform corrosion-induced cracking in concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 281, 109131. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2023.109131.
- Fang, X., Pan, Z., Ma, R., 2024. Chen, A. multi-phase multi-species phase field model for non-uniform corrosion and chloride removal in concrete, *Journal of Building Engineering* 82
- Ferreira, R. M., Gulikers, J., Andrade, C. (Eds.). 2012. V International PhD Student Workshop on Durability of Reinforced Concrete: From Composition to Service Life Design.
- François, R., Arliguie, G. 1999. Effect of microcracking and cracking on the development of corrosion in reinforced concrete members. *Magazine of Concrete Research*, 51(2), 143–150. DOI: 10.1680/mac.1999.51.2.143.
- François, R., Khan, I., Vu, N. A., Mercado, H., Castel, A. 2012. Study of the impact of localised cracks on the corrosion mechanism. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 16(3–4), 392–401. DOI: 10.1080/19648189.2012.667982.
- François, R., Laurens, S., Deby, F. 2218. *La corrosion et ses conséquences sur les ouvrages en béton armé*. ISTE Éditions.
- François, R., Maso, J. C. 1988. Effect of damage in reinforced concrete on carbonation or chloride penetration. *Cement and Concrete Research*, 18(6), 961–970. DOI: 10.1016/0008-8846(88)90033-6.
- Fritih, Y., Vidal, T., Turatsinze, A., Pons, G. 2013. Flexural and Shear Behavior of Steel Fiber Reinforced SCC Beams, *KSCCE Journal of Civil Engineering*, vol.17(6) 1383-1393. DOI: 10.1007/s12205-013-1115-1
- Geiker, M., Danner, T., Michel, A., Belda Revert, A., Linderoth, O., Hornbostel, K. 2021. 25 years of field exposure of pre-cracked concrete beams; combined impact of spacers and cracks on reinforcement corrosion. *Construction and Building Materials*, 286, 122801. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122801.
- German, M., Pamin, J. 2023. Cracking in reinforced concrete cross-sections due to non-uniformly distributed corrosion. *Materials*, 16, 6331. DOI: 10.3390/ma16186331.
- Ghantous, R. M., Poyet, S., L'Hostis, V., Tran, N.-C., François, R. 2017. Effect of crack openings on carbonation-induced corrosion. *Cement and Concrete Research*, 95, 257–269. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.02.014.
- Ghantous, R. M. et al. 2018. Relation between crack opening and extent of the damage induced at the steel/mortar interface. *Construction and Building Materials*, 193, 97–104. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.176.
- Goto, Y., Otsuka, K. 1971. Cracks formed in concrete around deformed tension bars. *ACI Journal Proceedings*, 68(4). DOI: 10.14359/11325.
- Gran, H. C. 1995. Fluorescent liquid replacement technique. A mean of crack detection and water-binder ratio determination in high strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 25, 1063–1074.
- Grassl, P., Davies, T. 2011. Lattice modelling of corrosion induced cracking and bond in reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33, 918–924. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.05.005.
- Guzman, S., Galvez, J. C., Sancho, J. M. 2012. Modelling of corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete by an embedded cohesive crack finite element. *Engineering Fracture Mechanics*, 93, 92–107. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2012.06.010.

- Hansson, C., Poursaeed, A., Laurent, A. 2006. Macrocell and microcell corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes. *Cement and Concrete Research*, 36(11), 2098–2102.
- Hess, L. 2024. Etude du mécanisme de corrosion en fond de fissure du béton armé en présence de chlorures. Doctoral thesis, Université de Toulouse. Available: <https://theses.fr/2024TLSEI034>
- Hess, L., François, R., Boutillon, L., Linger, L., L'Hostis, V. 2022. An experimental protocol to generate and sustain load-induced cracking in reinforced concrete members for durability study.
- Hilloulin, B., Hilloulin, D., Grondin, F., Loukili, A., De Belie, N. 2016. Mechanical regains due to self-healing in cementitious materials: Experimental measurements and micro-mechanical model. *Cement and Concrete Research*, 80. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.11.005.
- Hornain, H., Marchand, J., Ammouche, A., Commène, J. P., Moranville, M. 1996. Microscopic observation of cracks in concrete – A new sample preparation technique using dye impregnation. *Cement and Concrete Research*, 26, 573–583.
- Hornbostel, K., Geiker, M. 2017. Influence of cracking on reinforcement corrosion.
- Hu, X., Xu, H., Xi, X., Zhang, P., Yang, S. 2022. Meso-scale phase field modelling of reinforced concrete structures subjected to corrosion of multiple reinforcements. *Construction and Building Materials*, 321, 126376. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126376.
- Husain, S. I., Ferguson, P. M. 1968. Flexural crack width at the bars in reinforced concrete beams.
- Jacobsen, S., Marchand, J., Gerard, B. 1998. Concrete cracks I: durability and self healing – a review. *Proceedings of CONSEC*, 98, 217–231.
- Jaffer, S. J., Hansson, C. M. 2008. The influence of cracks on chloride-induced corrosion of steel in ordinary Portland cement and high performance concretes subjected to different loading conditions. *Corrosion Science*, 50(12), 3343–3355. DOI: 10.1016/j.corsci.2008.09.018.
- Ji, Y., Hu, Y., Zhang, L., Bao, Z. 2016. Laboratory studies on influence of transverse cracking on chloride-induced corrosion rate in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 69, 28–37. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2015.12.006.
- Jiménez-Quero, V., Montes-García, P. 2010. Influence of concrete cracking on the corrosion of steel reinforcement. p. 383–389.
- Jin, H., Yu, S. 2022. Study on corrosion-induced cracks for the concrete with transverse cracks using an improved CDM-XFEM. *Construction and Building Materials*, 318, 126173. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126173.
- Kagermanov, A., Markovic, I. 2023. An overview on finite element-modelling techniques for structural capacity assessment of corroded reinforced concrete structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, 19(11), 1585–1599. DOI: 10.1080/15732479.2022.2045612.
- Kanavaris, F., Coelho, M., Ferreira, N., Azenha, M., Andrade, C. 2023. A review on the effects of cracking and crack width on corrosion of reinforcement in concrete. *Structural Concrete*. DOI: 10.1002/suco.202300227.
- Khan, I., François, R., Castel, A. 2014. Prediction of reinforcement corrosion using corrosion induced cracks width in corroded reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Research*, 56, 84–96. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.006.
- Kobayashi, K., Kojima, Y. 2017. Effect of fine crack width and water cement ratio of SHCC on chloride ingress and rebar corrosion. *Cement and Concrete Composites*, 80, 235–244. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.03.006.
- Kondratova, I. L., Montes, P., Bremner, T. W. 2003. Natural marine exposure results for reinforced concrete slabs with corrosion inhibitors, *Cement and Concrete Composites*, vol. 25, no. 4-5, 483-490
- Korec, E., Jirásek, M., Wong, H. S., Martínez-Pañeda, E. 2023. A phase-field chemo-mechanical model for corrosion-induced cracking in reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 393, 131964. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131964.

- Korec, E., Jirásek, M., Wong, H. S., Martínez-Pañeda, E. 2024. Phase-field chemo-mechanical modelling of corrosion-induced cracking in reinforced concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 129, 104233. DOI: 10.1016/j.tafmec.2023.104233.
- Li, C. Q. 2000. Corrosion initiation of reinforcing steel in concrete under natural salt spray and service loading – Results and analysis. *ACI Materials Journal*, 97(6). DOI: 10.14359/9983.
- Li, W., Liu, W., Wang, S. 2017. The effect of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–11. DOI: 10.1155/2017/3968578.
- Litorowicz, A. 2006. Influence of crack system quantified by means of optical fluorescence microscopy and image analysis on concrete properties. *Cement and Concrete Research*, 36, 1508–1515.
- Liu, Y., Weyers, R. E. 1998. Modelling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures. *ACI Materials Journal*, 95(6), 675–681. DOI: 10.14359/410.
- Liu, Q.F. , Hu, Z., Wang, X.E., Zhao, H., Qian, K., Li, L.J., Z. Meng Z., 2022. Numerical study on cracking and its effect on chloride transport in concrete subjected to external load, *Construction and Building Materials*, 325
- Lors, C., Ducasse-Lapeyrousse, J., Gagné, R., Damidot, D. 2017. Microbiologically induced calcium carbonate precipitation to repair microcracks remaining after autogenous healing of mortars. *Construction and Building Materials*, 141. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.026.
- Lun, P.-Y., Zhang, X.-G., Jiang, C., Ma, Y.-F., Fu, L. 2021. Modelling of corrosion-induced concrete cover cracking due to chloride attacking. *Materials*, 14, 1440. DOI: 10.3390/ma14061440.
- Mac, M. J., Yio, M. H. N., Desbois, G., Casanova, I., Wong, H. S., Buenfeld, N. R. 2021. 3D imaging techniques for characterising microcracks in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 140, 106309.
- Marcotte, T., Hansson, C. 2003. The influence of silica fume on the corrosion resistance of steel in high performance concrete exposed to simulated sea water. *Journal of Materials Science*, 38, 4765–4776.
- Martínez-Pañeda, E., 2024. Phase-field simulations opening new horizons in corrosion research, *MRS Bulletin*, Vol. 49
- Michel, A., Otieno, M., Stang, H., Geiker, M. R. 2016. Propagation of steel corrosion in concrete: Experimental and numerical investigations. *Cement and Concrete Composites*, 70, 171–182. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2016.04.007.
- Michel, A., Solgaard, A. O. S., Pease, B. J., Geiker, M. R., Stang, H., Olesen, J. F. 2013. Experimental investigation of the relation between damage at the concrete-steel interface and initiation of reinforcement corrosion in plain and fibre reinforced concrete. *Corrosion Science*, 77, 308–321. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.08.019.
- Michel, A., Sørensen, H. E., Geiker, M. R. 2021. 5 years of in situ reinforcement corrosion monitoring in the splash and submerged zone of a cracked concrete element. *Construction and Building Materials*, 285, 122923. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122923.
- Misra, S., Uomoto, T. 1991. Corrosion under simultaneous diverse exposure conditions. In: *Durability of Concrete*, American Concrete Institute, vol. V.M. Malho, p. 423–441.
- Miyazato, S., Otsuki, N. 2010. Steel corrosion induced by chloride or carbonation in mortar with bending cracks or joints. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 8(2), 135–144.
- Mohammed, T. U., Otsuki, N., Hamada, H. 2003. Corrosion of steel bars in cracked concrete under marine environment. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(5), 460–469. DOI: 10.1061/(asce)0899-1561(2003)15:5(460).
- Mohammed, T. U., Otsuki, N., Hamada, H., Yamaji, T. 2002. Chloride-induced corrosion of steel bars in concrete with presence of gap at steel-concrete interface. *Materials Journal*, 99(2), 149–156.
- Mohammed, T. U., Otsuki, N., Hisada, M., Shibata, T. 2001. Effect of crack width and bar types on corrosion of steel in concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 13, 194–201.

- Montes, P., Bremner, T. W., Lister, D. H. 2004. Influence of calcium nitrite inhibitor and crack width on corrosion of steel in high performance concrete subjected to a simulated marine environment. *Cement and Concrete Composites*, 26(3), 243–253. DOI: 10.1016/S0958-9465(03)00043-X.
- Najjar, W. S., Aderhold, H. C., Hover, K. C. 1986. The application of neutron radiography to study of microcracking in concrete. *Cement, Concrete and Aggregates*, 8, 103–109.
- Naotunna, C. N., Samindi, S. M., Samarakoon, M. K., Fosså, K. T. 2021. Experimental investigation of crack width variation along the concrete cover depth in RC specimens with ribbed and smooth bars. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00593.
- Nemati, K. M., Monteiro, P. J. M., Scrivener, K. L. 1998. Analysis of compressed stress-induced cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, 95(5), 617–630.
- NF EN 12390-5 Essais pour béton durci - Partie 5 : résistance à la flexion des éprouvettes, juin 2019
- NF EN 12390-6 Essai pour béton durci - Partie 6 : détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes 2012
- NF EN 14651 Méthode d'essai du béton de fibres métalliques - Mesurage de la résistance à la traction par flexion (limite de proportionnalité (LOP), résistance résiduelle) Décembre 2007
- Nguyen, T.-T., Francois, R., Vu, T., Carcasses, M., « A comparison between uniform and galvanic corrosion rate in carbonation induced corrosion of reinforced concrete », *MATEC Web of Conferences*, vol. 364, sept. 2022, doi: 10.1051/mateconf/202236402025
- O'Neil, E. F. 1980. Study of reinforced concrete beams exposed to marine environment. American Concrete Institute.
- Okada, K., Toyoaki, M. 1980. Chloride corrosion of reinforcing steel in cracked concrete. *Special Publications*, 65, 237–254.
- Otieno, M. 2016. Sensitivity of chloride-induced corrosion rate of steel in concrete to cover depth, crack width and concrete quality. *Materials and Structures*, 50(1), 9. DOI: 10.1617/s11527-016-0916-3.
- Otieno, M., Beushausen, H., Alexander, M. 2012. Towards incorporating the influence of cover cracking on steel corrosion in RC design codes: the concept of performance-based crack width limits. *Materials and Structures*, 45(12), 1805–1816. DOI: 10.1617/s11527-012-9871-9.
- Otieno, M., Beushausen, H., Alexander, M. 2015. Resistivity-based chloride-induced corrosion rate prediction models and hypothetical framework for interpretation of resistivity measurements in cracked RC structures. *Materials and Structures*, 49(6), 2349–2366. DOI: 10.1617/s11527-015-0653-z.
- Otieno, M., Beushausen, H., Alexander, M. 2016. Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete – Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments. *Cement and Concrete Research*, 79, 373–385. DOI: 10.1016/j.cemconres.2015.08.009.
- Otieno, M. B., Alexander, M. G., Beushausen, H.-D. 2010. Corrosion in cracked and uncracked concrete – influence of crack width, concrete quality and crack reopening. *Magazine of Concrete Research*, 62(6), 393–404. DOI: 10.1680/macr.2010.62.6.393.
- Pacheco, J., Polder, R. 2012. Corrosion initiation and propagation in cracked concrete – a literature review. In: *Advances in Modeling Concrete Service Life*, C. Andrade & J. Gulikers (Eds.), Dordrecht: Springer Netherlands, p. 85–93. DOI: 10.1007/978-94-007-2703-8_9.
- Pan, T., Lu, Y. 2012. Stochastic modeling of reinforced concrete cracking due to nonuniform corrosion: FEM-based cross-scale analysis. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 698–706. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000427.
- Paradis, F. 2009. Influence de la fissuration du béton sur la corrosion des armatures caractérisation des produits de corrosion formés dans le béton. Doctoral thesis, p. 289.

- Pease, B. J. 2006. Photogrammetric assessment of flexure induced cracking in reinforced concrete beams under service loads. In: Proceedings of the 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Quebec City, Canada. DOI: 10.1617/2351580028.041.
- Pérez Caldentey, A., Peiretti, H. C., Iribarren, J. P., Soto, A. G. 2013. Cracking of RC members revisited: influence of cover, ϕ/ρ_s , e_f and stirrup spacing - an experimental and theoretical study, *Structural Concrete*, 14(2013), n°1. DOI: 10.1002/suco.201200016
- Poston, R. W., Carrasquillo, R. L., Breen, J. E. 1987. Durability of post-tensioned bridge decks. *Materials Journal*, 84(4), 315–326.
- Poursaeed, A., Hansson, C. M. 2008. The influence of longitudinal cracks on the corrosion protection afforded reinforcing steel in high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 38(8), 1098–1105. DOI: 10.1016/j.cemconres.2008.03.018.
- Pugliesi, R., Andrade, M. L. G. 1997. Study of cracking in concrete radiography by neutron. *Applied Radiation and Isotopes*, 48(3), 339–344.
- Ramirez, D.E., Meira, G.R., Quattrone, M., John, V.M. 2023, A review on reinforcement corrosion propagation in carbonated concrete – Influence of material and environmental characteristics. *Cement and Concrete Composites*, 140. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2023.105085.
- Ramm, W., Biscop, M. 1998. Autogenous healing and reinforcement corrosion of water-penetrated separation cracks in reinforced concrete. *Nuclear Engineering and Design*, 179(2), 191–200. DOI: 10.1016/S0029-5493(97)00266-5.
- Ranaivomanana, H., Verdier, J., Sellier, A., Bourbon, X. 2013. Sealing process induced by carbonation of localized cracks in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 37. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.12.008.
- Robuschi, S., Ivanov, O. L., Geiker, M., Fernandez, I., Lundgren, K. 2022. Impact of cracks on distribution of chloride-induced reinforcement corrosion. *Materials and Structures*, 56(1), 7. DOI: 10.1617/s11527-022-02085-6.
- Rossi, E., Polder, R., Copuroglu, O., Nijland, T., Šavija, B. 2020. The influence of defects at the steel/concrete interface for chloride-induced pitting corrosion of naturally-deteriorated 20-years-old specimens studied through X-ray computed tomography. *Construction and Building Materials*, 235, 117474. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117474.
- Sakai, K., Sasaki, S. 1994. Ten year exposure test of precracked reinforced concrete in a marine environment. *ACI Symposium Publications*, 145. DOI: 10.14359/4109.
- Savija, B., Lukovic, M., Pacheco, J., Schlangen, E. 2013. Cracking of the concrete cover due to reinforcement corrosion: A two-dimensional lattice model study. *Construction and Building Materials*, 44, 626–638. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.063.
- Schießl, P., Raupach, M. 1997. Laboratory studies and calculations on the influence of crack width on chloride-induced corrosion of steel in concrete. *Materials Journal*, 94(1), 56–61.
- Scott, A., Alexander, M. G. 2007. The influence of binder type, cracking and cover on corrosion rates of steel in chloride-contaminated concrete. *Magazine of Concrete Research*, 59(7), 495–505. DOI: 10.1680/macr.2007.59.7.495.
- Seetharam, S. C., Laloy, E., Jivkov, A., Yu, L., Phung, Q. T., Pham, N. P., Kursten, B., Druyts, F. 2019. A mesoscale framework for analysis of corrosion induced damage of concrete. *Construction and Building Materials*, 216, 347–361. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.252.
- Shaikh, F. U. A. 2018. Effect of cracking on corrosion of steel in concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(1), 3. DOI: 10.1186/s40069-018-0234-y.
- Shen, J., Gao, X., Li, B., Du, K., Jin, R., Chen, W., Xu, Y. 2019. Damage evolution of RC beams under simultaneous reinforcement corrosion and sustained load. *Materials*, 12, 627. DOI: 10.3390/ma12040627.
- Stefanoni, M., Angst, U., Elsener, B., Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete— A critical review, *Cement and Concrete Research* 103 (2018) 35–48

- Subramaniam, K. V., Bi, M. 2010. Investigation of steel corrosion in cracked concrete: Evaluation of macrocell and microcell rates using Tafel polarization response. *Corrosion Science*, 52(8), 2725–2735. DOI: 10.1016/j.corsci.2010.04.030.
- Suzuki, K., Ohno, Y., Praparntanatorn, S., Tamura, H. 1990. Mechanism of steel corrosion in cracked concrete. In: *Corrosion of Reinforcement in Concrete. Papers presented at the Third International Symposium on Corrosion of Reinforcement in Concrete Construction*, Belfry Hotel, Wishaw, Warwickshire, May 21–24, 1990.
- Tammo, K., Thelandersson, S. 2006. Crack opening near reinforcement bars in concrete structures. *Structural Concrete*, 7(4), 137–143.
- Thybo, A. E. A., Michel, A., Stang, H. 2017. Smearred crack modelling approach for corrosion-induced concrete damage. *Materials and Structures*, 50, 146. DOI: 10.1617/s11527-017-0999-5.
- Torres, J., Andrade, C. 2013. Influence of crack width in degradation of long term structures.
- Touil, B., Ghomari, F., Bezzar, A., Khelidj, A., Bonnet, S., 2017. Effect of temperature on chloride diffusion in saturated concrete. *ACI Materials Journal*, 114, 713–721
- Tremper, B. 1947. The corrosion of reinforcing steel in cracked concrete. *Journal Proceedings*, 44(11), 1137–1144.
- Tuutti, K. 1982. Corrosion of steel in concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-3051>
- Van den Heede, P., Van Belleghem, B., Alderete, N., Van Tittelboom, K., De Belie, N. 2016. Neutron radiography based visualization and profiling of water uptake in (un)cracked and autonomously healed cementitious materials. *Materials*, 9, 311–339.
- Van Tittelboom, K., Snoeck, D., Vontobel, P., Wittmann, F. H., De Belie, N. 2013. Use of neutron radiography and tomography to visualize the autonomous crack sealing efficiency in cementitious materials. *Materials and Structures*, 46, 105–121.
- Vidal, T., Castel, A., François, R. 2004. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(1), 165–174. DOI: 10.1016/S0008-8846(03)00246-1.
- Vidal, T., Cagnon, H., Nguyen, N., Torrenti, J.-M., Sellier, A., Risk due to creep of prestressed concrete at moderate temperature, *International Conference of Engineering Risk INCER 2019*, 3-5 april 2019, Beyrouth, Lebanon.
- Wang, J., Basheer, P., Nanukuttan, S., Bai, Y. 2015. Influence of cracking caused by structural loading on chloride-induced corrosion process in reinforced concrete elements: A review. In: *Durability of Reinforced Concrete from Composition to Protection: Selected Papers of the 6th International RILEM PhD Workshop held in Delft, The Netherlands*, July 4–5, 2013, Springer, p. 99–113.
- Wang, J., Yuan, Y., Xu, Q., Qin, H. 2022. Prediction of corrosion-induced longitudinal cracking time of concrete cover surface of reinforced concrete structures under load. *Materials*, 15, 7395. DOI: 10.3390/ma15207395.
- Wu, J.-Y., Chen, W.-X. 2022. On the phase-field modeling of fully coupled chemo-mechanical deterioration and fracture in calcium leached cementitious solids. *International Journal of Solids and Structures*, 238, 111380. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111380.
- Xi, X., Yang, S. 2018. A new model for corrosion-induced concrete cracking. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures*, July 18–20, 2018, University of Leeds, Leeds, West Yorkshire, LS2 9JT, United Kingdom.
- Xia, X., Qin, C., Lu, G., Gu, X., Zhang, Q. 2024. Simulation of corrosion-induced cracking of reinforced concrete based on fracture phase field method. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 138(3). DOI: 10.32604/cmescs.2023.031238.
- Yan, X., Tian, Y., Yan, D., Pan, L., Zhou, Q., Zhang, G., Pei, L., Lu, X., Jiang, B., Pan, W. 2024. Corrosion-induced cracking model of concrete considering a transverse constraint. *Materials*, 17, 3217. DOI: 10.3390/ma17133217.

- Yuan, Y., Ji, Y. 2009. Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure. *Construction and Building Materials*, 23(6), 2461–2466. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.026.
- Yu, L., François, R., Dang, V. H., L'Hostis, V., Gagné, R. 2015. Development of chloride-induced corrosion in pre-cracked RC beams under sustained loading: Effect of load-induced cracks, concrete cover, and exposure conditions. *Cement and Concrete Research*, 67, 246–258. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.10.007.
- Zhang, J., Ling, X., Guan, Z. 2017. Finite element modeling of concrete cover crack propagation due to non-uniform corrosion of reinforcement. *Construction and Building Materials*, 132, 487–499. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.019.
- Zhang, P., Wittmann, F. H., Lura, P., Müller, H. S., Han, S., Zhao, T. 2018. Application of neutron imaging to investigate fundamental aspects of durability of cement-based materials: A review. *Cement and Concrete Research*, 108, 152–166.
- Zhang, P., Wittmann, F. H., Zhao, T., Lehmann, E. H. 2010. Neutron imaging of water penetration into cracked steel reinforced concrete. *Physica B*, 405, 1866–1871.
- Zhang, R., Castel, A., François, R. 2010. Concrete cover cracking with reinforcement corrosion of RC beam during chloride-induced corrosion process. *Cement and Concrete Research*, 40(3), 415–425. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.09.026.
- Zhang, W., François, R., Cai, Y., Charron, J.-P., Yu, L. 2020. Influence of artificial cracks and interfacial defects on the corrosion behavior of steel in concrete during corrosion initiation under a chloride environment. *Construction and Building Materials*, 253, 119165. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119165.
- Zhang, W., François, R., Yu, L. 2020. Influence of load-induced cracks coupled or not with top-casting-induced defects on the corrosion of the longitudinal tensile reinforcement of naturally corroded beams exposed to chloride environment under sustained loading. *Cement and Concrete Research*, 129, 105972. DOI: 10.1016/j.cemconres.2020.105972.
- Zhao, Y., Hu, B., Yu, J., Jin, W. 2011a. Non-uniform distribution of rust layer around steel bar in concrete. *Corrosion Science*, 53(12), 4300–4308. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.08.045.
- Zhao, Y., Hu, B., Yu, J., Jin, W. 2011b. Comparison of uniform and non-uniform corrosion induced damage in reinforced concrete based on a Gaussian description of the corrosion layer. *Corrosion Science*, 53(9), 2803–2814. DOI: 10.1016/j.corsci.2011.05.017.
- Zhao, Y., Zhang, X., Ding, H., Jin, W. 2016. Non-uniform distribution of a corrosion layer at a steel/concrete interface described by a Gaussian model. *Corrosion Science*, 112, 1–12. DOI: 10.1016/j.corsci.2016.06.021.