

PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

Matinée de présentation et échanges

06 juin 2025

Maison des Travaux Publics



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Heure début	Intitulé
9h30	Accueil - Organisation de la matinée
9h40	Introduction
9h50	Contexte du projet
10h20	Dispositif Projet National
10h30	Présentations des Axes : 1. Expérimentations en Laboratoire 2. Etudes sur site 3. Solutions, prévention 4. Dissémination
11h30	Pause
11h45	Organisation du Projet : -Retroplanning du montage -Projet ANR
12h00	Discussion table ronde
12h30	Cocktail Déjeunatoire



PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

Introduction

Paul Acker
Consultant

PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



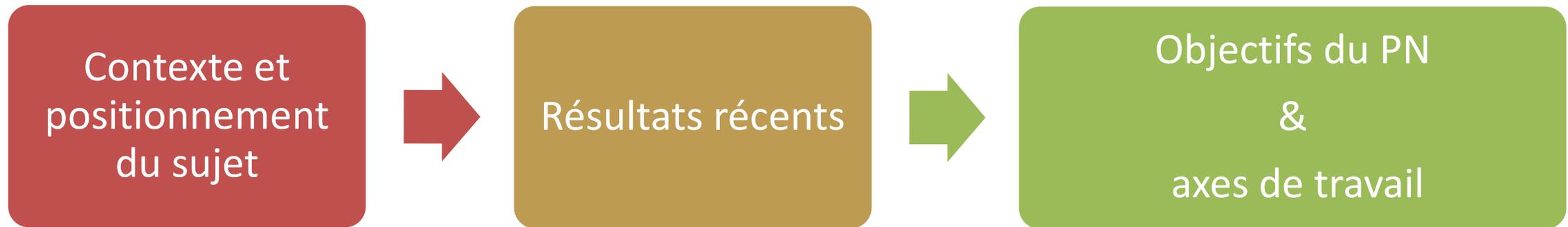
L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

Contexte du projet

Laurent Boutillon

Directeur Scientifique (Vinci Construction Grands Projets)

► Agenda



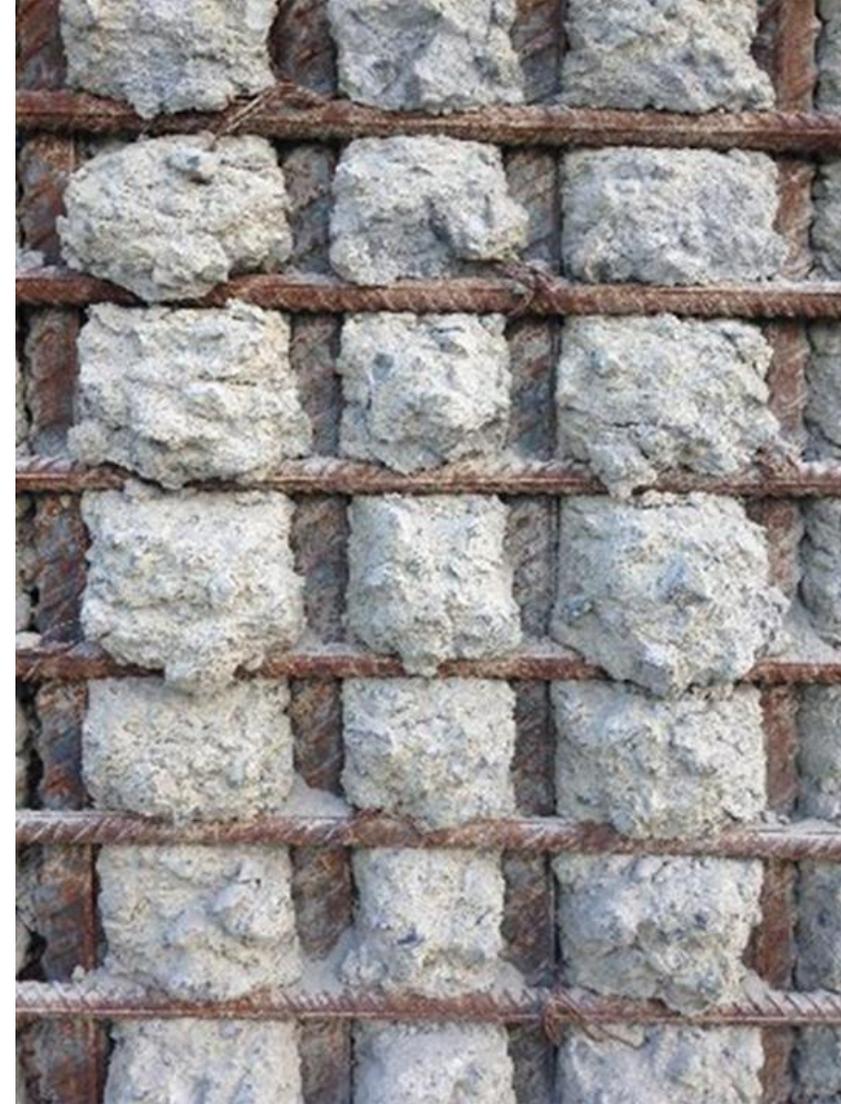
Augmentation régulière des ratios d'armatures en Génie Civil depuis 6 décennies

- Coût financier non proportionnels.
- Impact carbone élevé du matériau **Béton Armé** :
Pour un béton armé à 200 Kg/m^3 , la part de CO_2 apporté par les armatures varie entre 46 et 73 % selon l'origine des aciers et la formule de béton

Conférence GC – 2021 – Cachan, 8 et 9 juin 2021

Analyse de la part des aciers de construction dans l'impact environnemental des ouvrages en béton armé
Adélaïde Feraille (Ecole des Ponts PariTech), Antoine Simon (Vinci), Sébastien Maitenaz (Vinci Construction)

- Difficulté technique
Béton Durable => faible E/C => Visqueux => Difficulté de mise en œuvre => Risque accru de défaut dégradant la durabilité!



Valeur seuils d'ouverture de fissure en surface
Recommandé par l'Eurocode 2
.... Et les annexes Nationales

Table 4.59. Maximum crack width w_{max} [mm] according to the Danish NA.

Environmental class (see Table 4.11 pag.57)	Unstressed reinforcement	Tendons
Extra aggressive (XD2, XD3, XS3)	0.2 mm	0.1 mm
Aggressive (XD1, XS1, XS2)	0.3 mm	0.2 mm
Moderate (XC2, XC3, XC4)	0.4 mm	0.3 mm

Table 4.63. Maximum crack width [mm] according to Table D-2 of the Swedish NA.

Exposure class	Corrosion sensitive ¹			Lightly corrosion sensitive ¹		
	L100 ²	L 50	L 20	L 100	L 50	L 20
XC0	-	-	-	-	-	-
XC1	0.40	0.45	-	0.45	-	-
XC2	0.30	0.40	0.45	0.40	0.45	-
XC3, XC4	0.20	0.30	0.40	0.30	0.40	-
XS1, XS2, XD1, XD2	0.15	0.20	0.30	0.20	0.30	0.40
XS3, XD3	0.10	0.15	0.20	0.15	0.20	0.30

¹) Corrosion Sensitive is any reinforcement with diameter smaller than 4 mm, tendons or cold worked steel that permanently have tension greater than 400 MPa.

²) For determining w_f , should be taken into account the intended working life

Tableau 7.1N : Valeurs recommandées de w_{max} (mm)

Classe d'exposition	Éléments en béton armé et éléments en béton précontraint à armatures non adhérentes	Éléments en béton précontraint à armatures adhérentes
	Combinaison quasi-permanente des charges	Combinaison fréquente des charges
X0, XC1	0,4 ¹	0,2
XC2, XC3, XC4	0,3	0,2 ²
XD1, XD2, XD3, XS1, XS2, XS3		Décompression

NOTE 1 Pour les classes d'exposition X0 et XC1, l'ouverture des fissures n'a pas d'incidence sur la durabilité et cette limite est fixée pour donner un aspect dans l'ensemble acceptable. En l'absence de conditions sur l'aspect, cette limite peut être traitée de manière moins stricte.

NOTE 2 Pour ces classes d'exposition, en outre, il convient de vérifier la décompression sous la combinaison quasi-permanente des charges.

Texte General (UK, GER)

Tableau 7.1NF – Valeurs recommandées de w_{max} ⁽¹⁾ (mm)

Classe d'exposition	Éléments en béton armé et éléments en béton précontraint sans armatures adhérentes	Éléments en béton précontraint avec armatures adhérentes
	Combinaison quasi-permanente de charges	Combinaison fréquente de charges
X0, XC1	0,40 ⁽²⁾	0,20 ⁽²⁾
XC2, XC3, XC4	0,30 ⁽³⁾	0,20 ⁽⁴⁾
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3, XD3 ⁽⁵⁾	0,20	Décompression ⁽⁶⁾
XA1, XA2, XA3	A fixer dans les Documents Particuliers du Marché (DPM)	

Annexe nationale Française



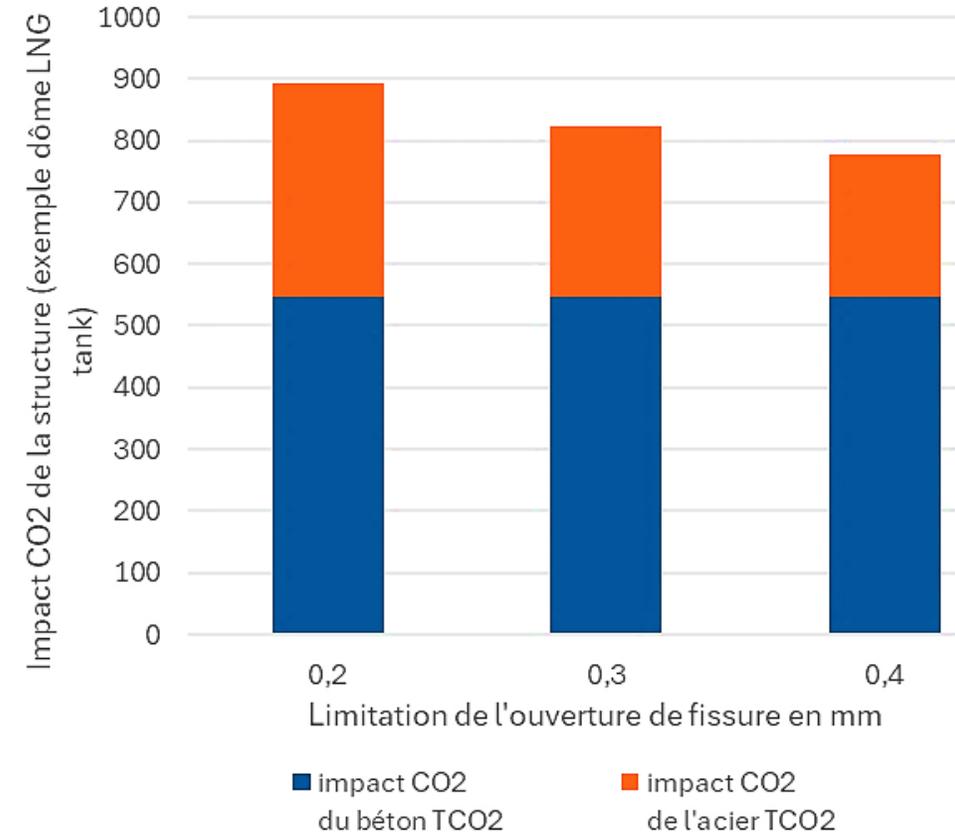
Comparaison BAEL/EC2 pour un élément de classe XS1 à comparer à « préjudiciable ».

1. Les règles de maîtrise de la fissuration concordent bien pour les sections courantes de bâtiment.
2. L'écart se creuse pour
 - les sections plus massives,
 - Les gros diamètres d'armatures,
 - Les forts enrobages
3. écarts similaires pour les parois moulées

	balcon	dalle	dalle C50/60	dalle HA40	dalle c=70mm
h (m)	0.25 →	1.20	1.20	1.20	1.20
fck (MPa)	25	25 →	50	50	50
∅ (mm)	14	32	32 →	40	32 et 40 alt
c (mm)	35	35	35	35 →	70
As (cm ²) BAEL : prej	8.2	36.7	34.6	34.6	35.7
As (cm ²) EC2 : 0.2mm ELSF	7.7	40.2	40.2	45.7	51.5
esp (mm)	200	200	200	275	200
Ratio EC2/BAEL (%)	94%	110%	116%	132%	144%



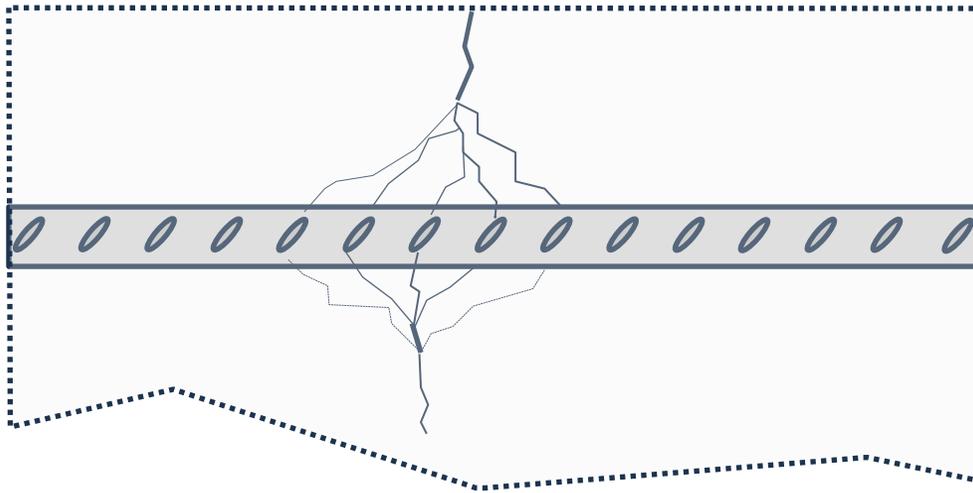
Comparaison pratique pour un dôme de réservoir de Gaz Naturel Liquéfié



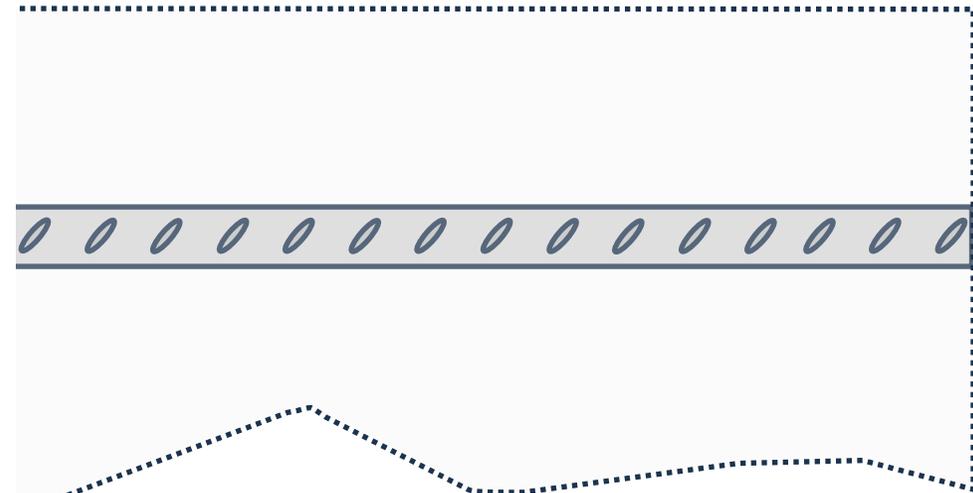
**70 t de CO₂ évité si on passe d'un seuil
d'ouverture de fissure
de 0.2 mm à 0.3 mm**



Regardons plus en détail cette problématique de l'effet de la fissure

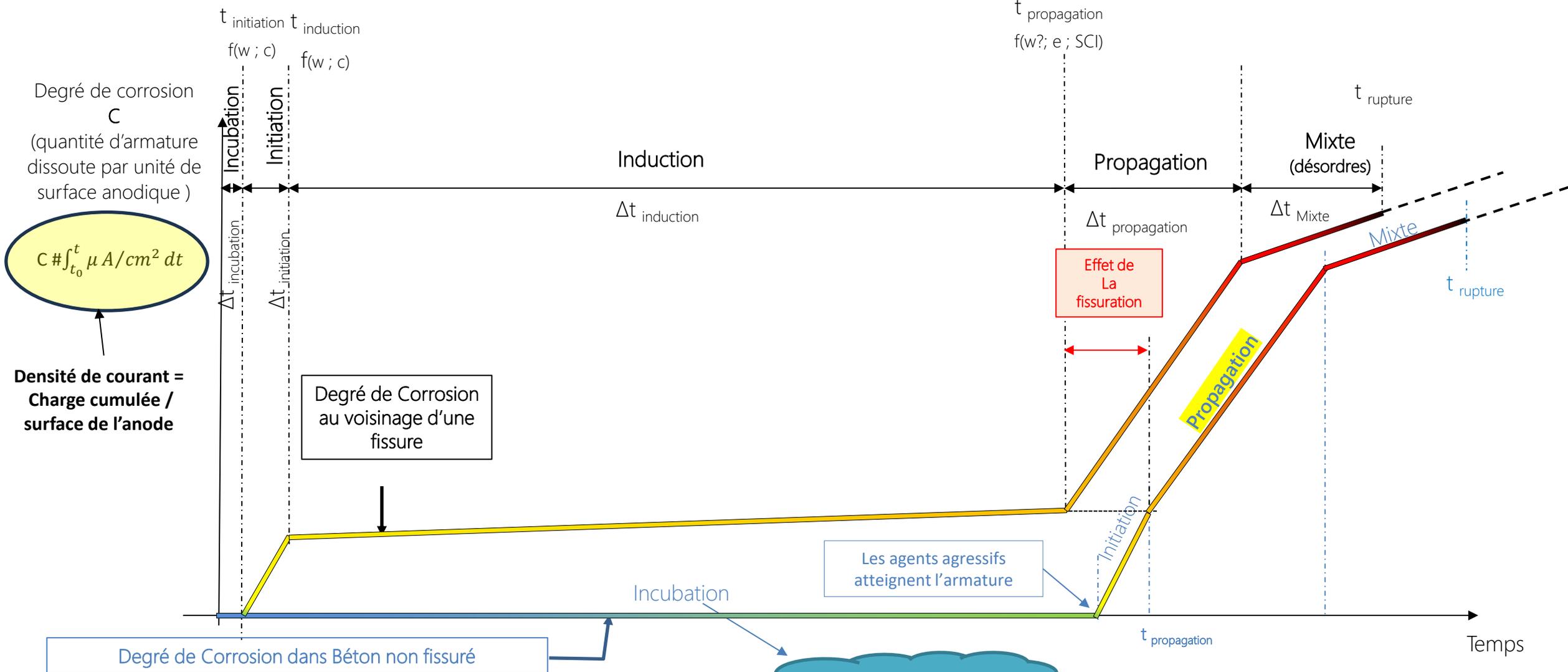


Béton armé en zone fissurée



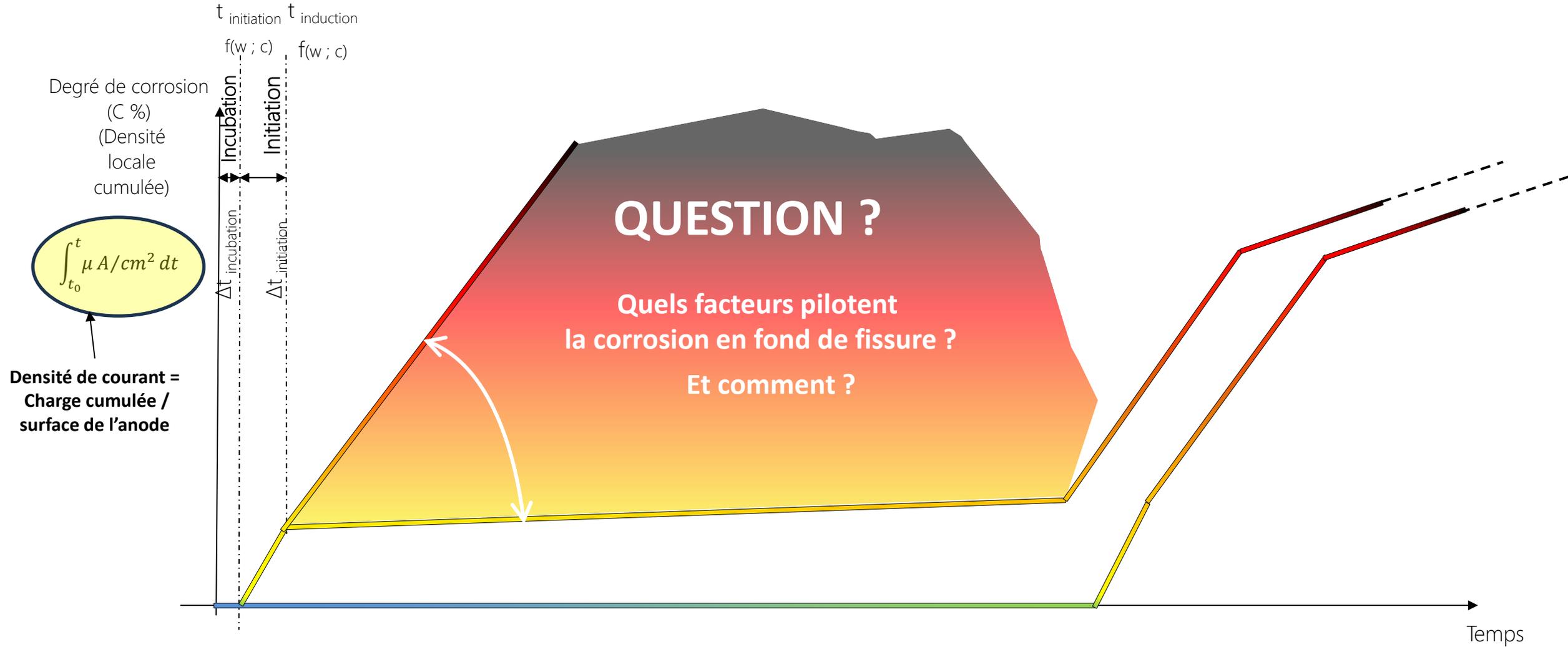
Béton armé en zone non fissurée



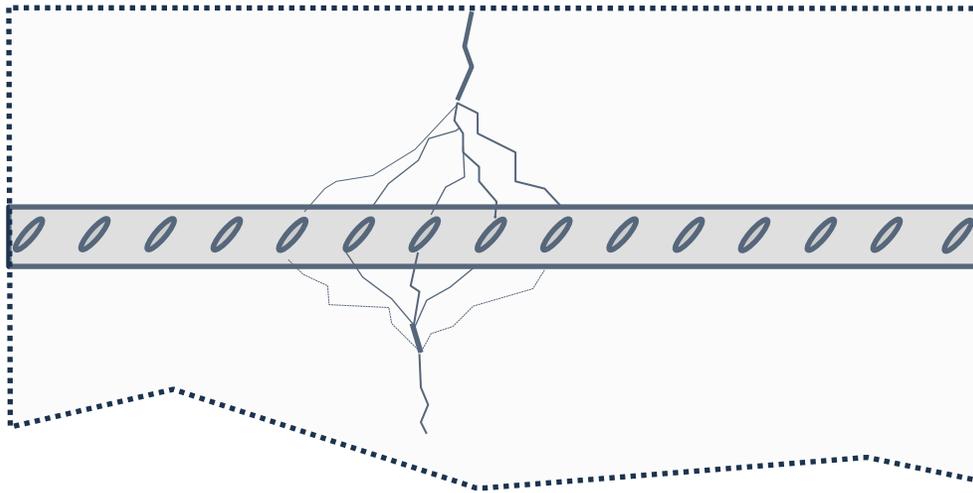


PN PERFDUB 2021

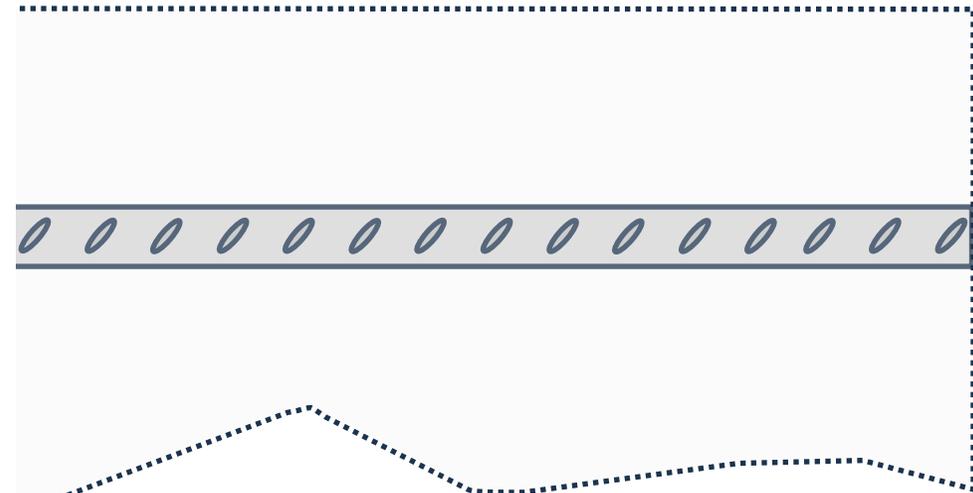




Insistons lourdement !!!!



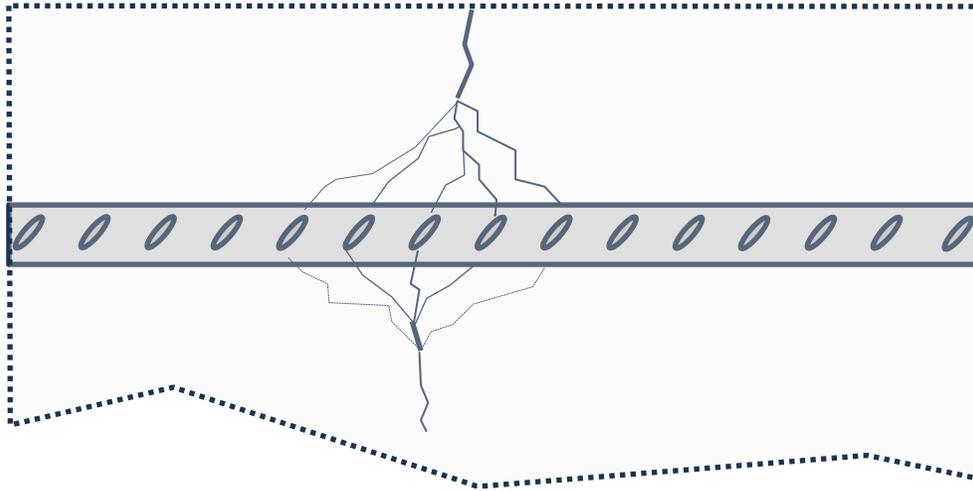
Béton armé en zone fissurée



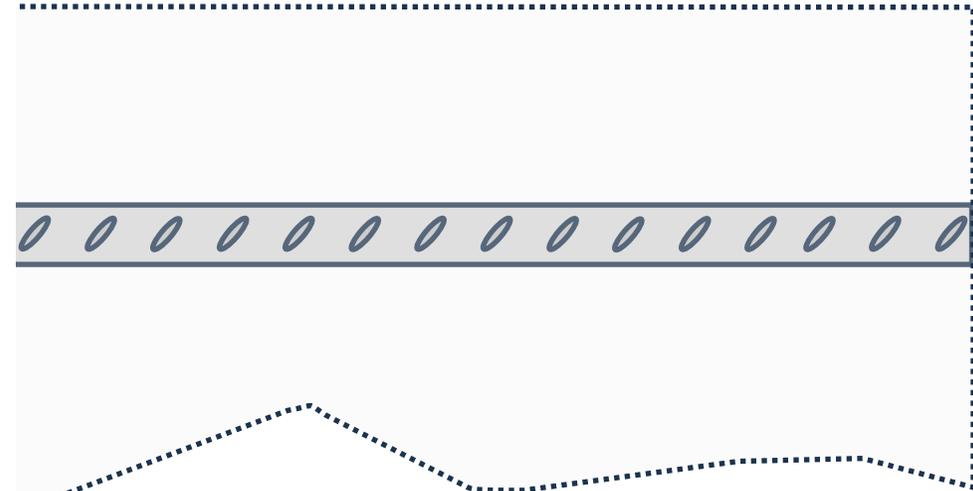
Béton armé en zone non fissurée



Date $T_0 + \varepsilon$
après fissuration /exposition à l'agression
(chlorures)



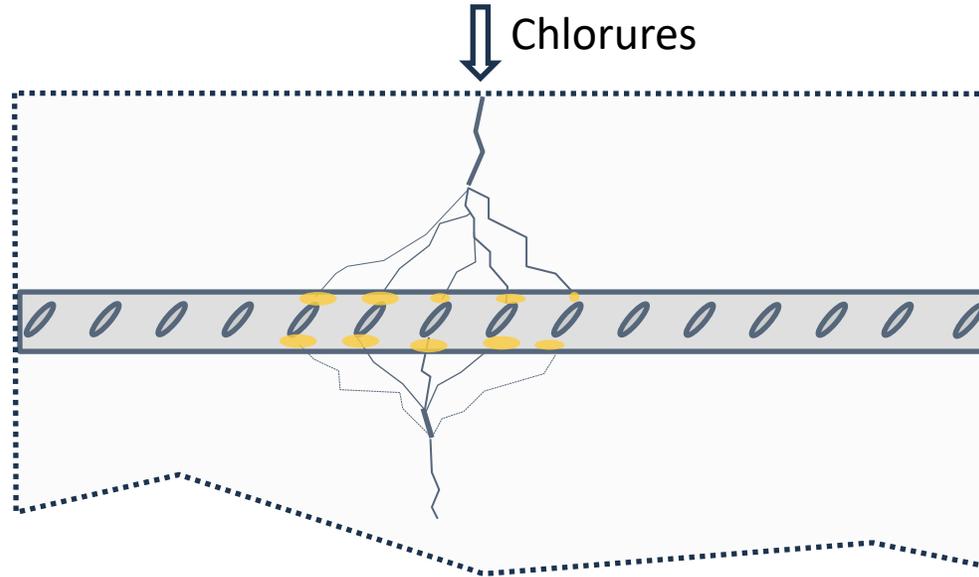
Béton armé en zone fissurée



Béton armé en zone non fissurée

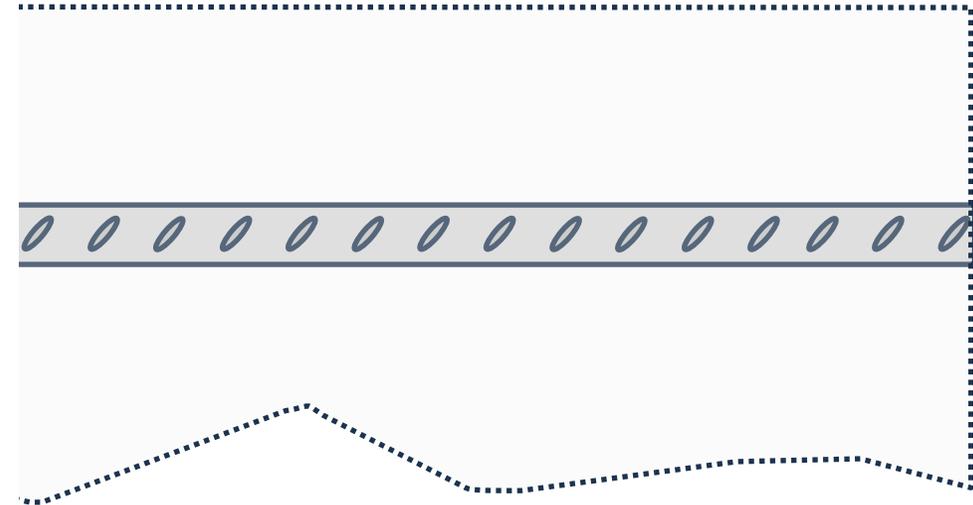


Date $T_1 = T_0 +$ quelques jours, semaines



Béton armé en zone fissurée

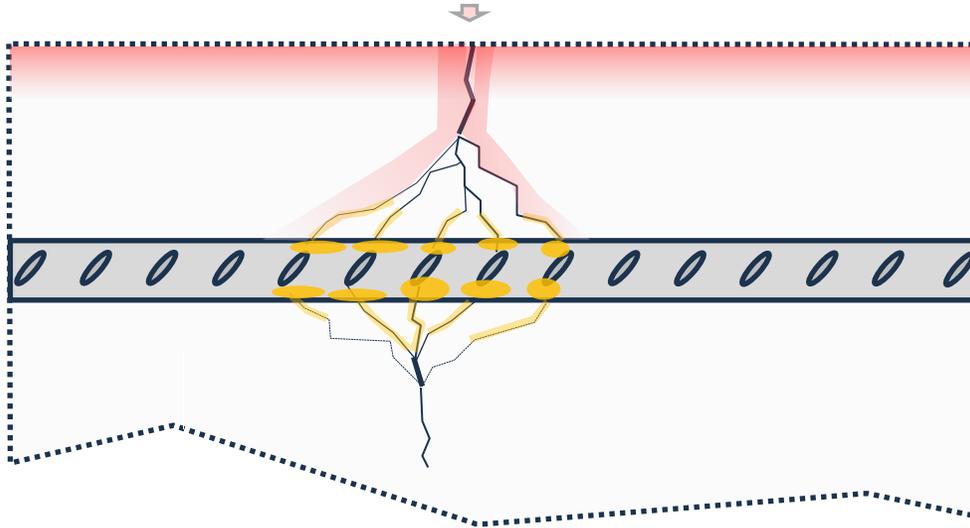
Apparition **quasi-immédiate** de zones anodiques en pied de chaque ramification



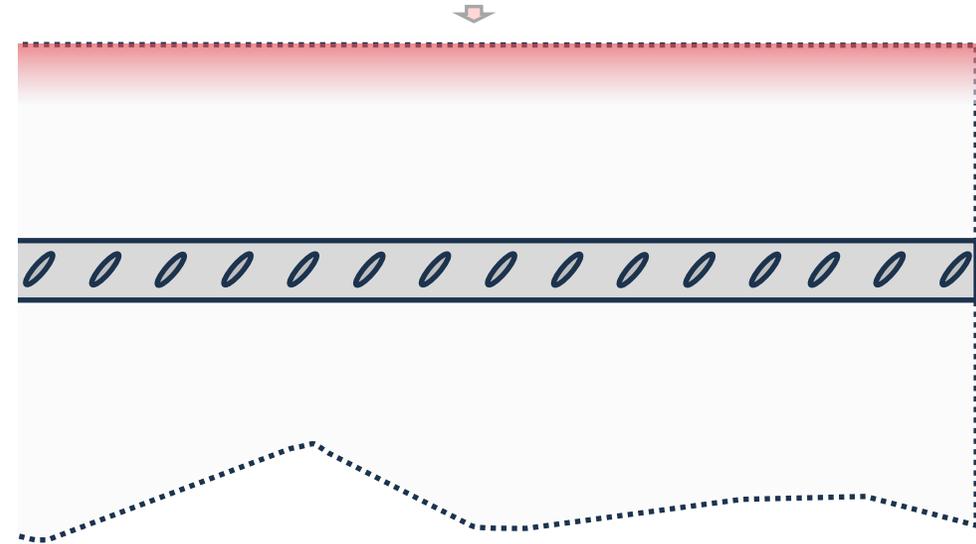
Béton armé en zone non fissurée



Date $T_2 = T_0 + \text{quelques mois}$



Zone fissurée

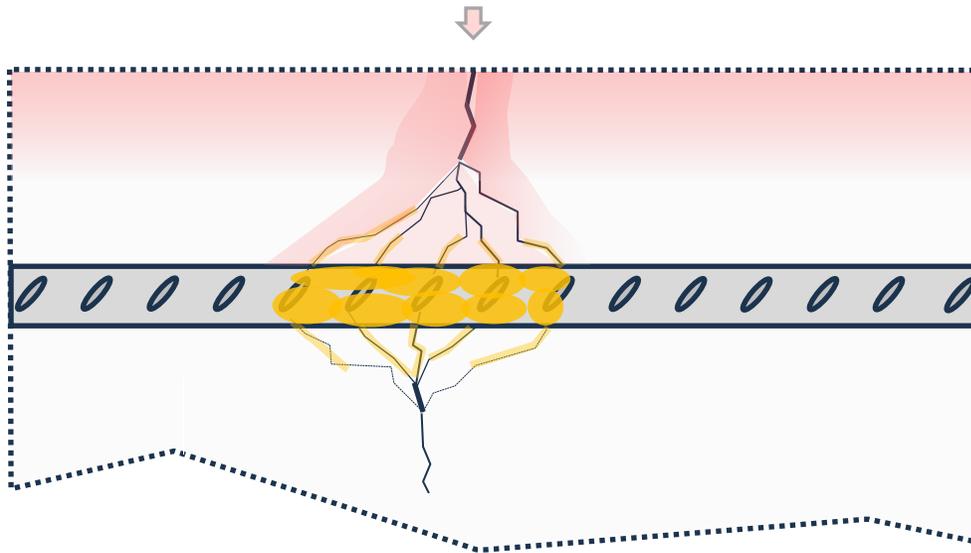


Zone non fissurée

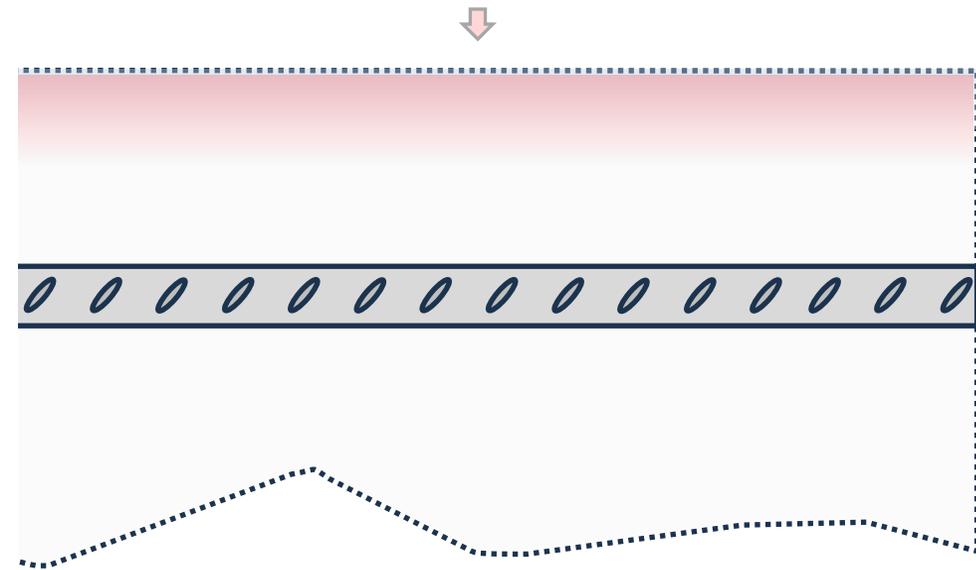


Date $T_3 = T_0 + \sim 1$ an

SCENARIO 1



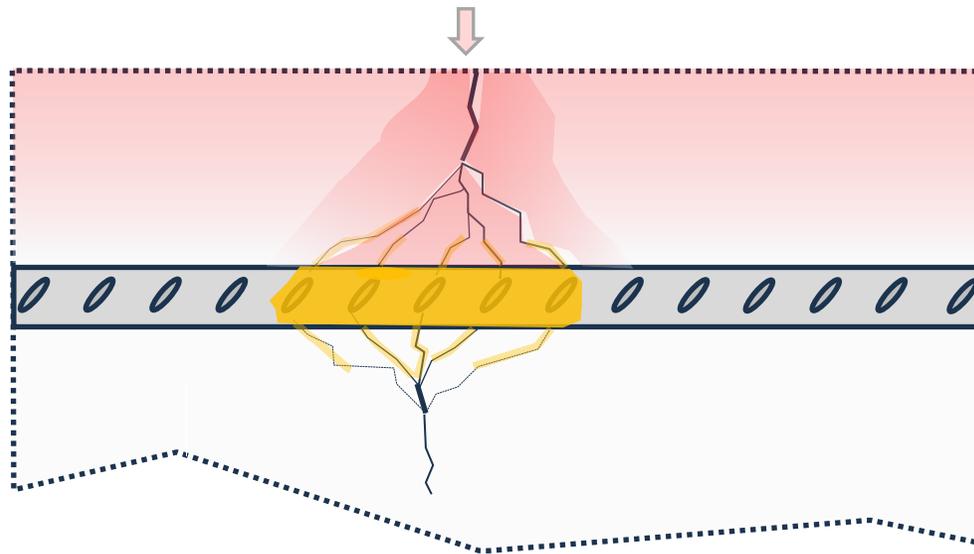
Zone fissurée



Zone non fissurée

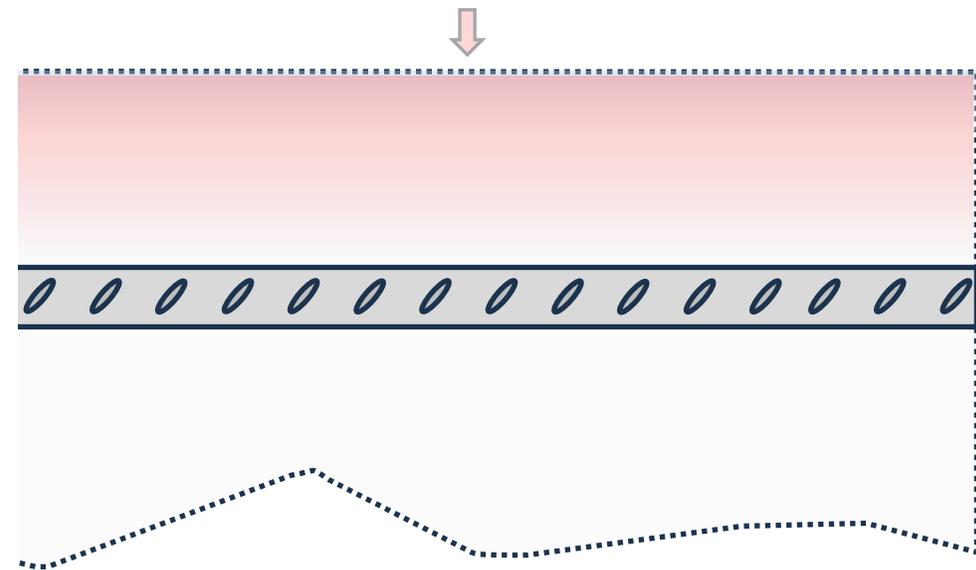


Scénario 1

Date $T_{4-1} = T_0 + \text{quelques années}$ 

Zone fissurée

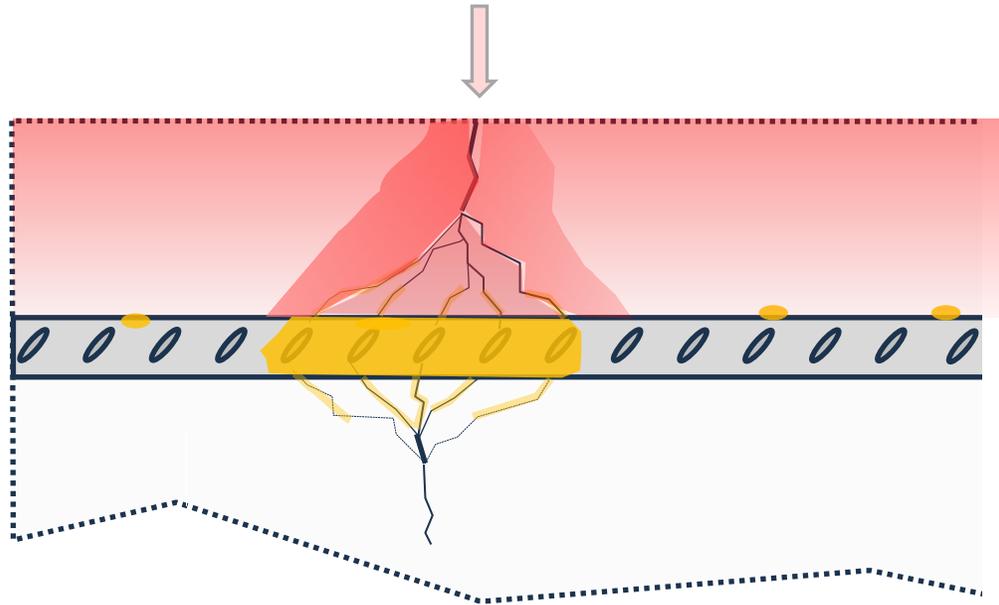
La corrosion ralentit fortement en fond de fissure
et reste sans influence notable



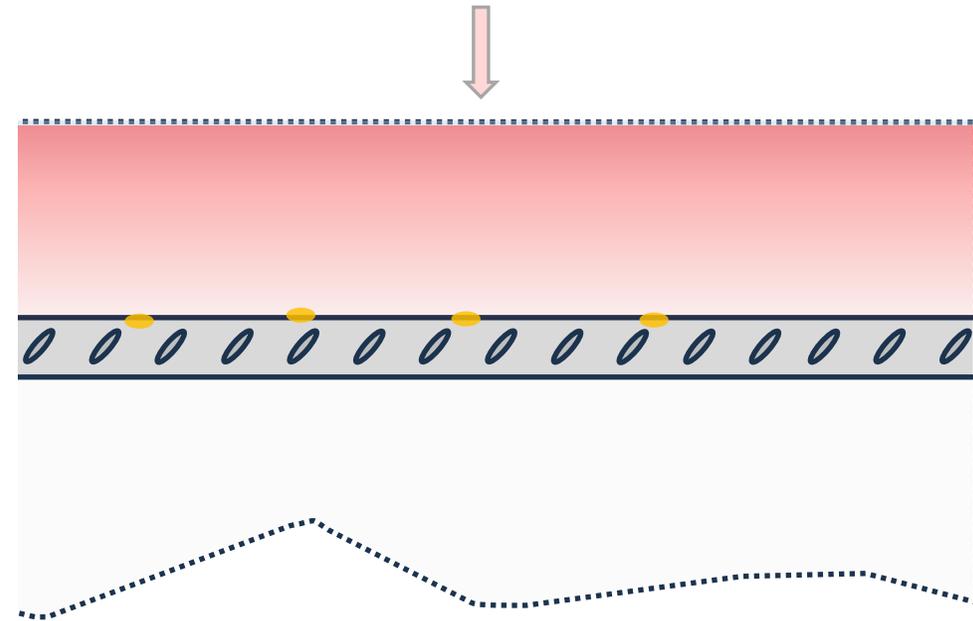
Zone non fissurée



Scénario 1

Date $T_{5-1} = L - \text{quelques années}$ ($L = \text{durée de vie théorique} = \text{life time}$)

Zone fissurée

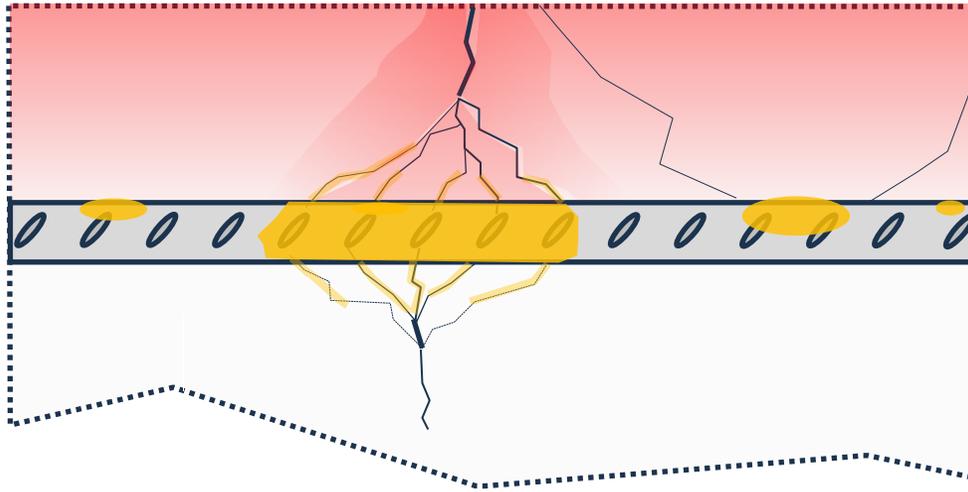


Zone non fissurée

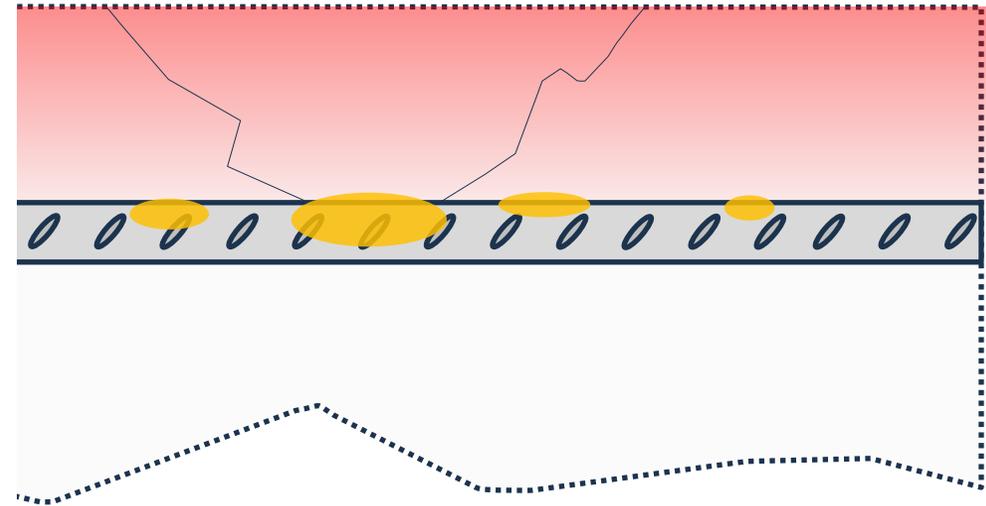
Les agents agressifs ont traversé l'enrobage et commencent à atteindre les armatures.
Les premières zones anodiques apparaissent en partie courante



Scénario 1

Date $T_{6-1} = L =$ Durée de vie Théorique

Zone fissurée



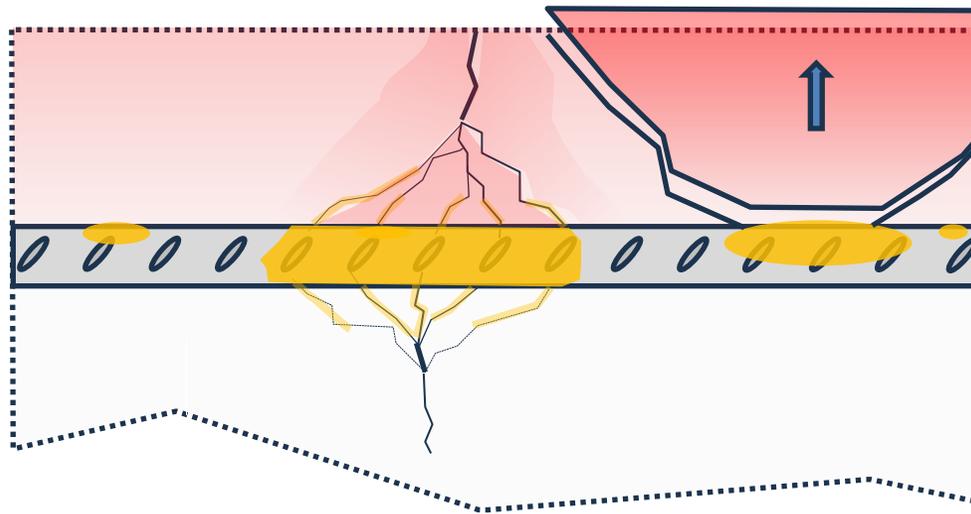
Zone non fissurée

La corrosion des armatures génère les premières fissures de corrosion visibles en surface du béton

fin de vie conventionnelle
(selon *fib MC 2020*)

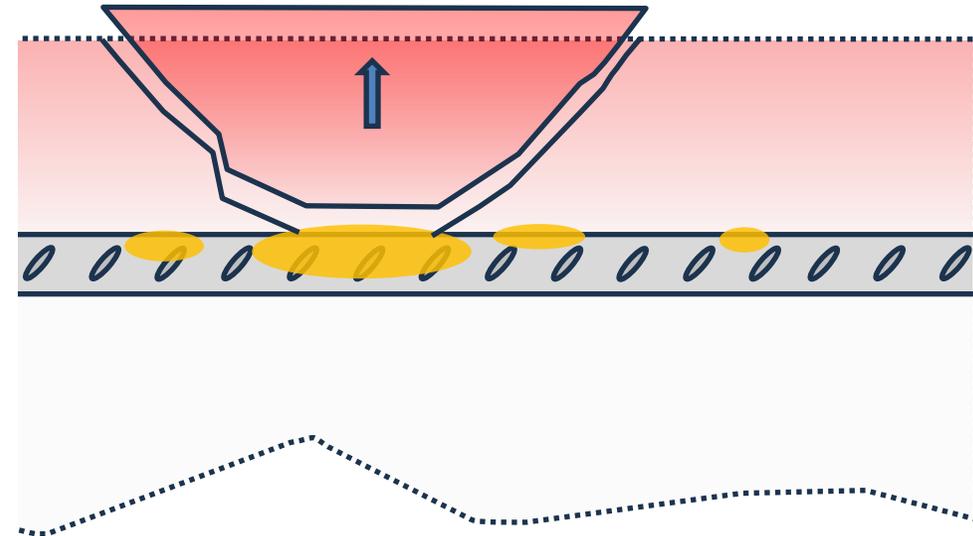


Scénario 1

Date $T_{7-1} = L + qq$ années

Zone fissurée

Le béton éclate sous la pression des produits de corrosion. Les armatures sont directement exposées, la dégradation devient extrêmement rapide. Des réparations lourdes sont nécessaires pour prolonger la durée de vie de la structure.



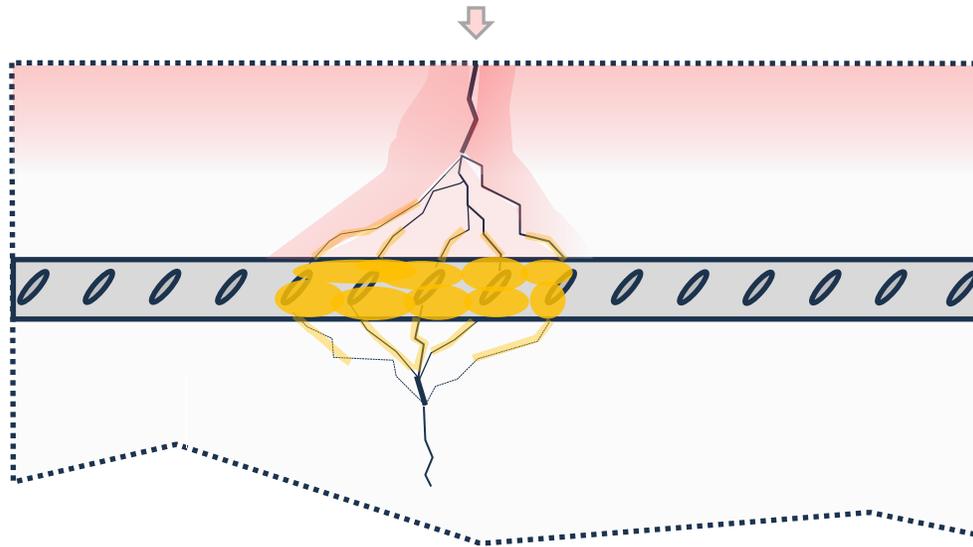
Zone non fissurée

Dans ce scénario 1 : La fissure a peu d'influence sur la durée de vie de l'ouvrage

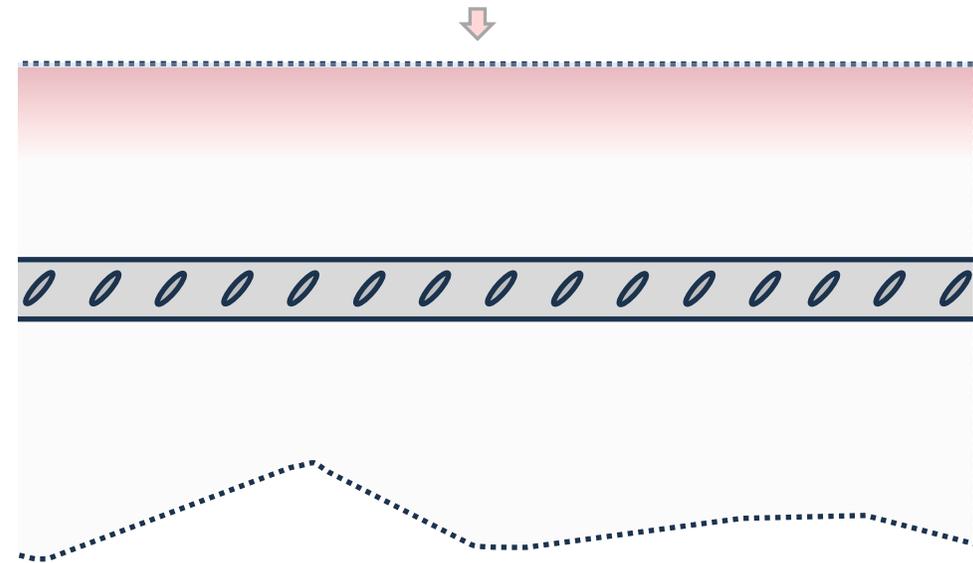


Date $T_3 = T_0 + \sim 1$ an

SCENARIO 2



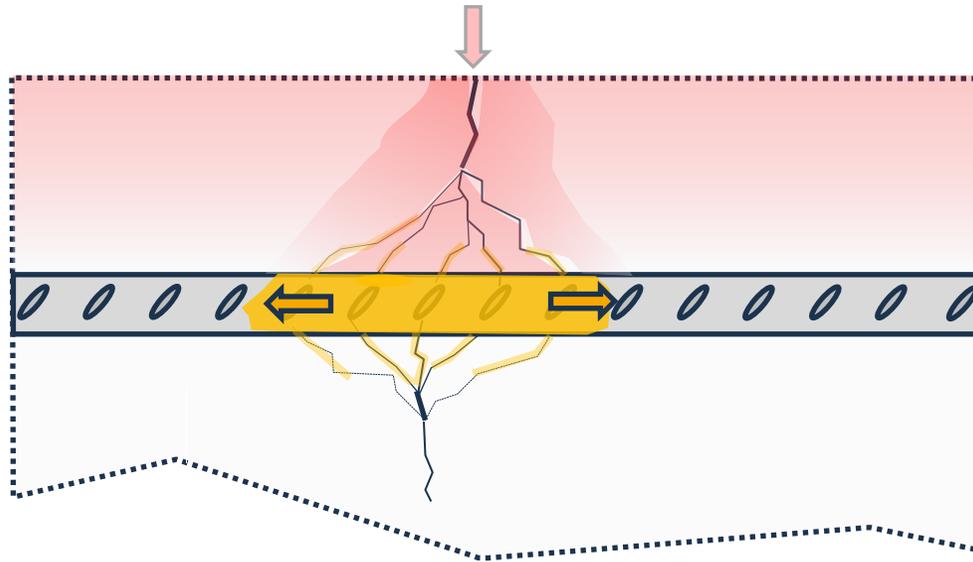
Zone fissurée



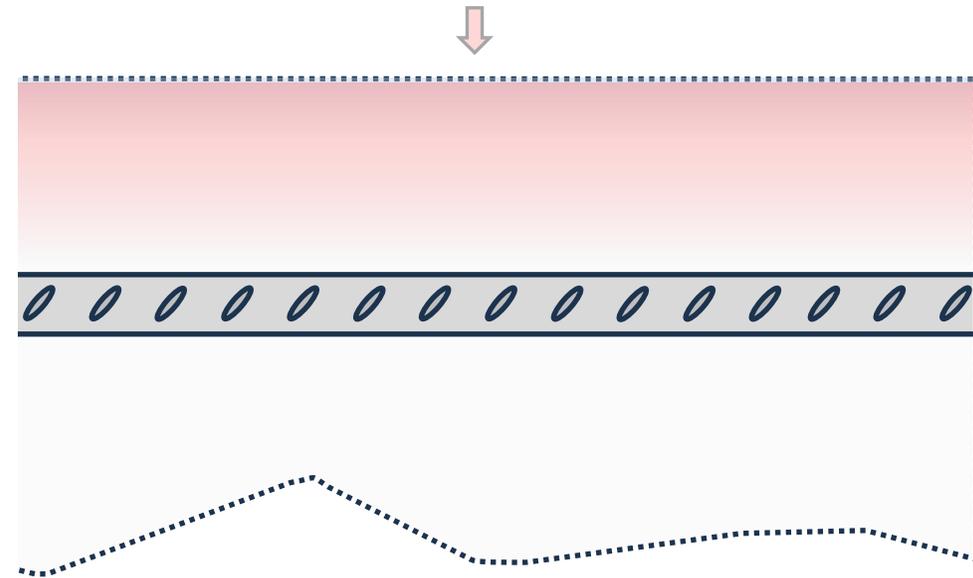
Zone non fissurée



Scénario 2

Date $T_{4-2} = T_0 + \text{quelques années}$ 

Zone fissurée

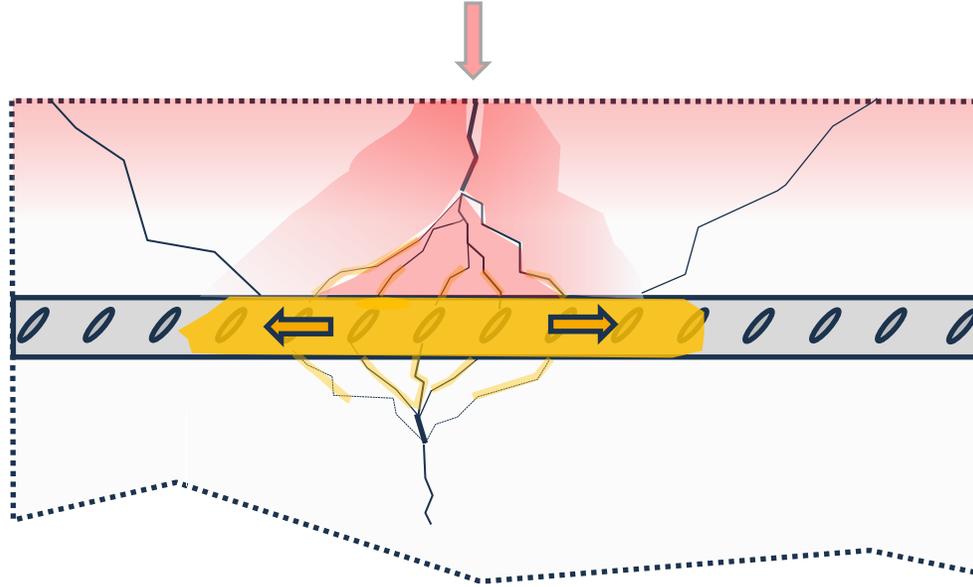


Zone non fissurée

La corrosion reste active et se propage de part et d'autre de la fissure le long de l'interface, les chlorures pénètrent le long de l'armature via les ramifications

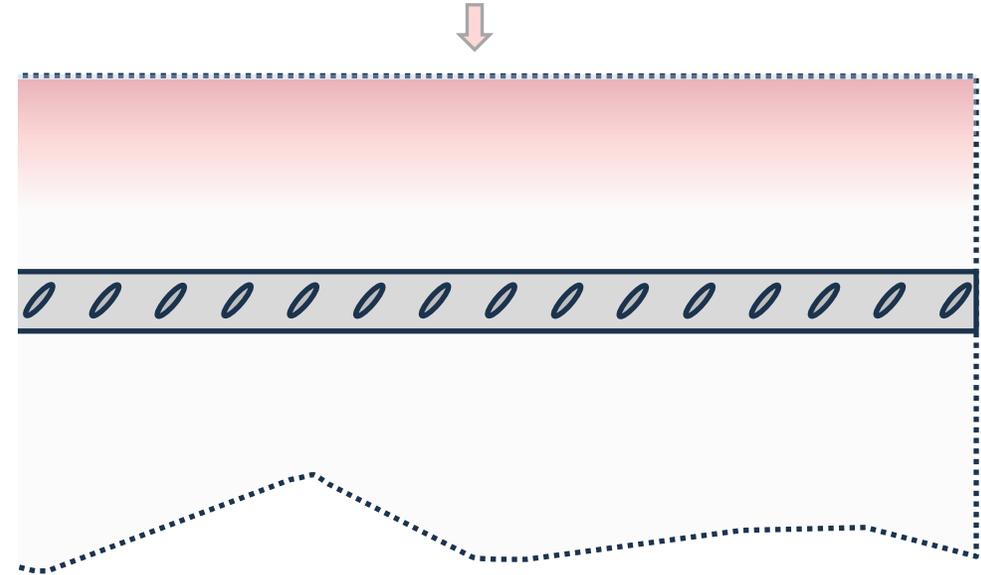


Scénario 2

Date $T_{5-2} \ll L$ 

Zone fissurée

La corrosion génère une pression de gonflement et provoque des fissures en surface

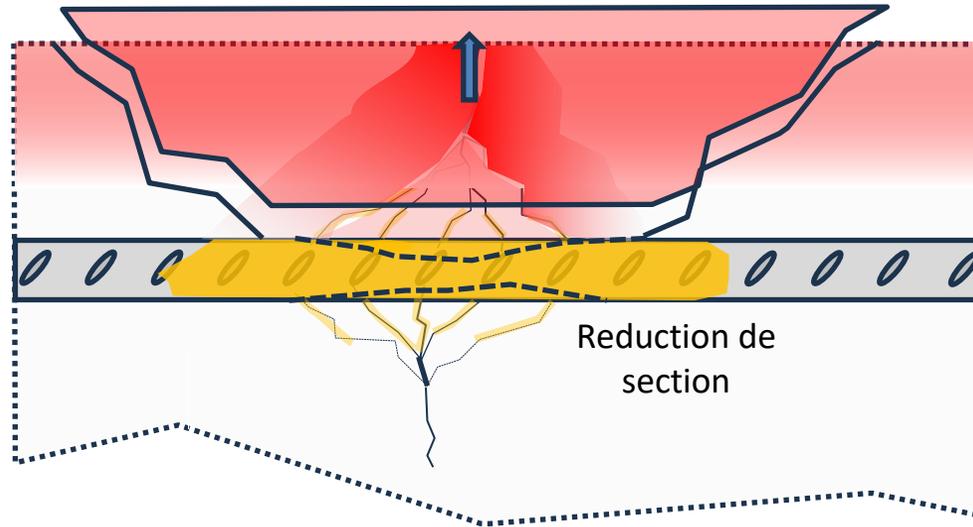


Zone non fissurée

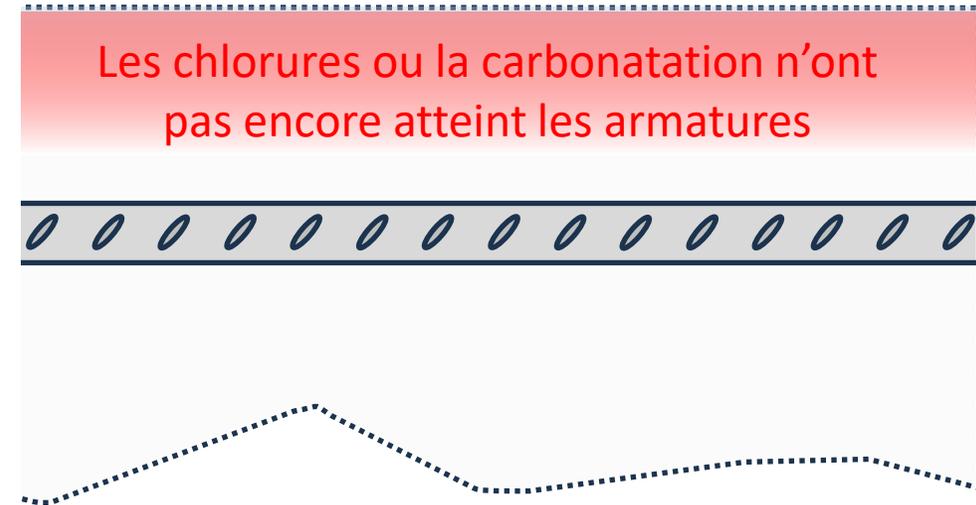
Les agents agressifs n'ont pas atteint les armatures
Il ne se passe rien en partie courante



Scénario 2

Date $T_{6-2} = \ll L + \text{peu d'années}$ 

Zone fissurée
Très abimée



Zone non fissurée
saine

Dans ce scénario 2 : La fissure à une forte d'influence sur la durée de vie de l'ouvrage



Questions majeures structurant le PN

- ▶ Quels sont les facteurs qui font passer du scénario 1 au scénario 2 ?
- ▶ La limitation de l'ouverture des fissures en surface est-elle
 - ✓ Toujours NECESSAIRE ?
 - ✓ Systématiquement SUFFISANTE ?



OBJECTIFS

- ▶ Mieux comprendre la fissure et ce qui se passe en fond de fissure à l'interface acier/béton afin d'assurer plus efficacement la durabilité, tout en minimisant les coûts environnementaux et financiers . (quantité armatures → complexité de réalisation).
- ▶ Apporter suffisamment de données pour peser et faire évoluer les codes en conséquence.



► Thèse Rita Ganthous (2016) – Cinétique de corrosion par carbonatation

145 Echantillons 70 x 70 x 280 mortier ou béton avec HA 6 au milieu
+ corps essai plus gros pour création de défaut d'interface

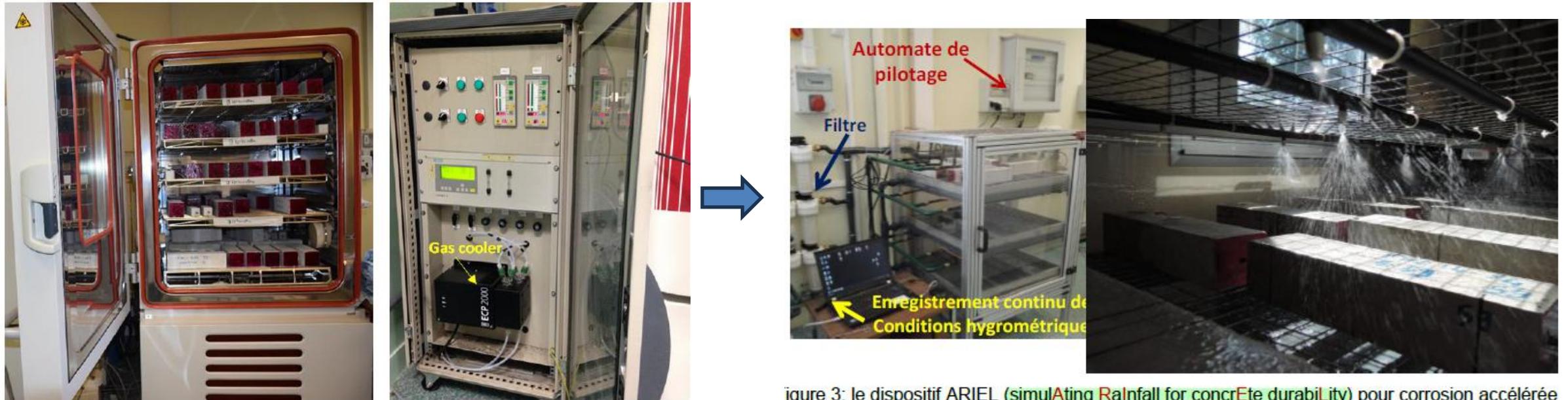


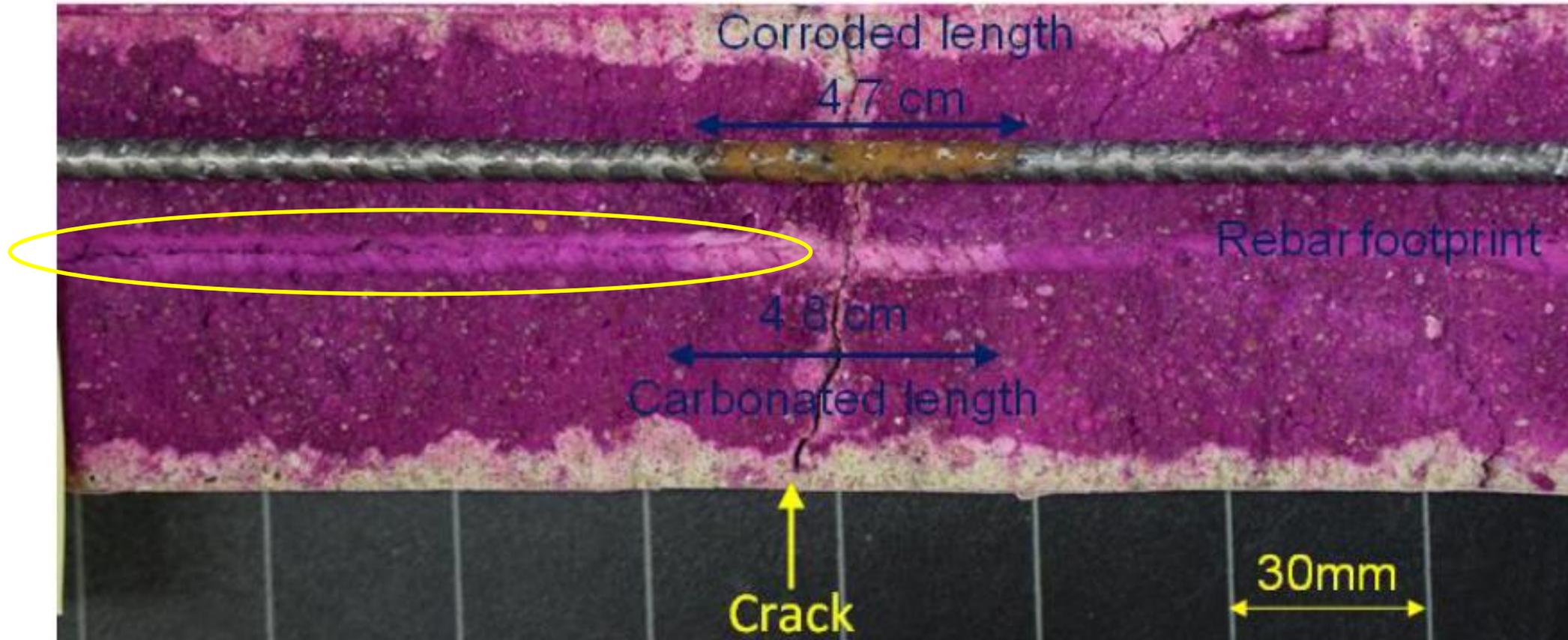
Figure 3: le dispositif ARIEL (simulATING Rainfall for concrEte durabiLity) pour corrosion accélérée par cycles de pluie en laboratoire

Phase 1 : carbonatation de la fissure
Exposition à 3% CO₂ 25°C, RH 55% - 1 mois

Phase 2 : Cycles humidité - séchage



► Thèse Rita Ganthous (2016) – Cinétique de corrosion par carbonatation

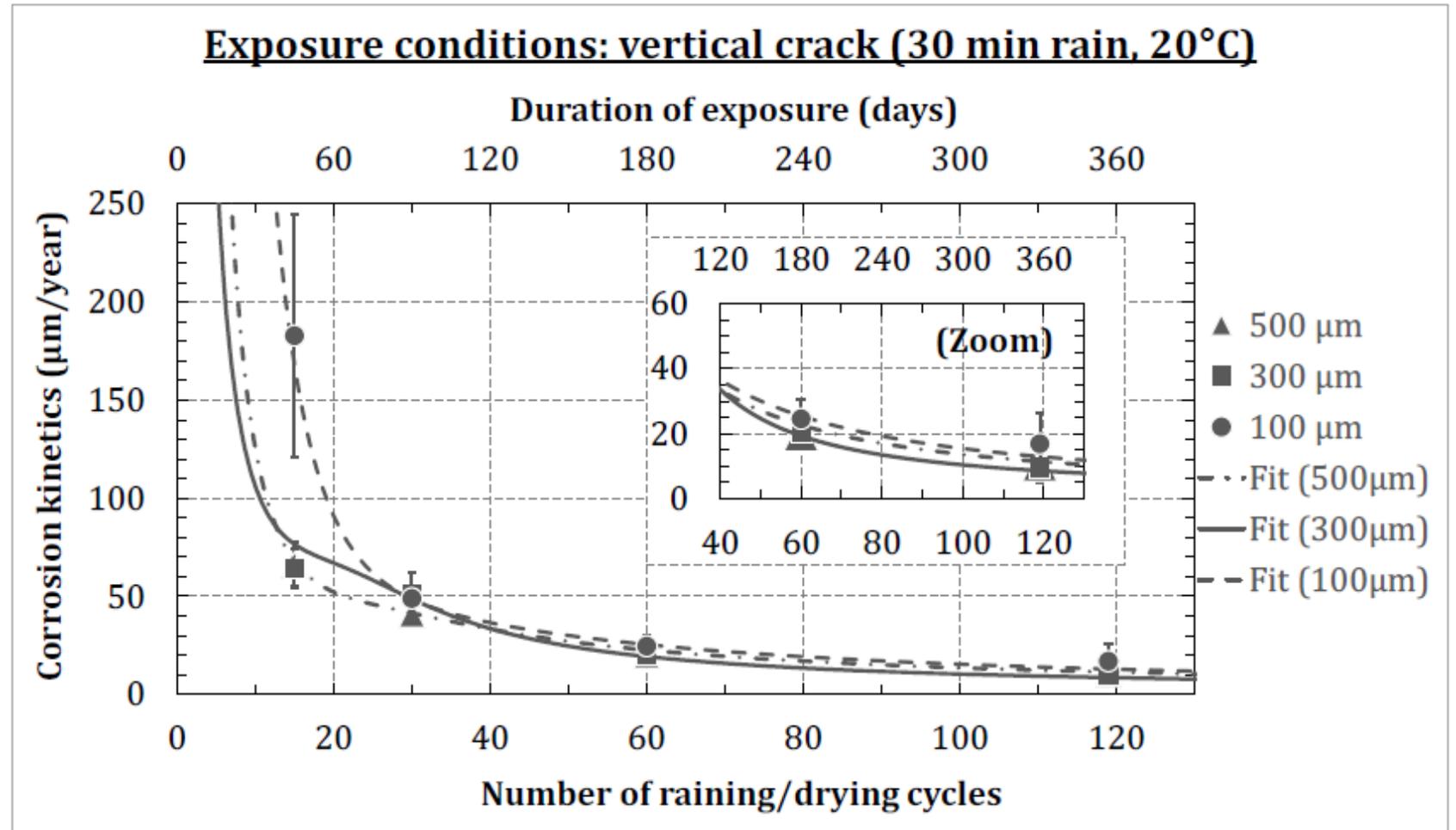


fissures peuvent être obtenues en contrôlant le chargement appliqué. **Trois ouvertures de fissures résiduelles après déchargement ont été choisies : 100, 300 et 500 μm** et ont été



► Thèse Rita Ganthous (2016) – Cinétique de corrosion par carbonatation

Cinétique de corrosion exprimée en épaisseur corrodée par unité de temps ($\mu\text{m}/\text{an}$)



► Thèse Rita Ganthous (2016) – Cinétique de corrosion par carbonatation

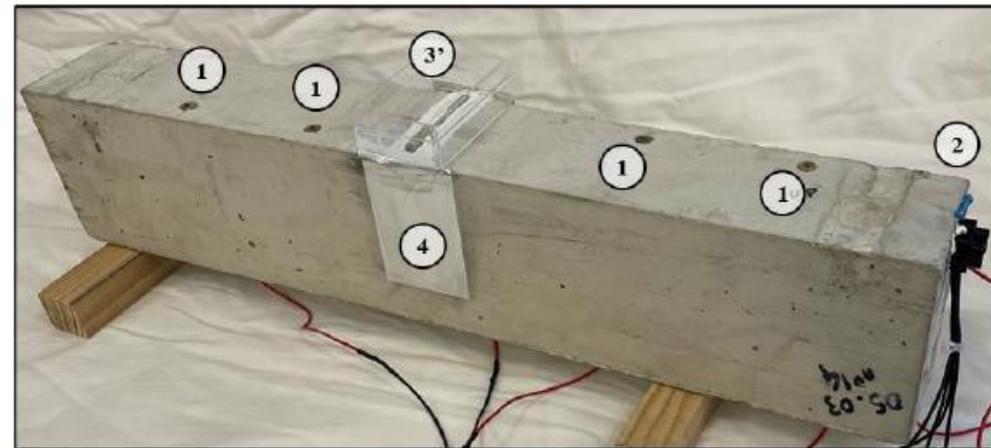
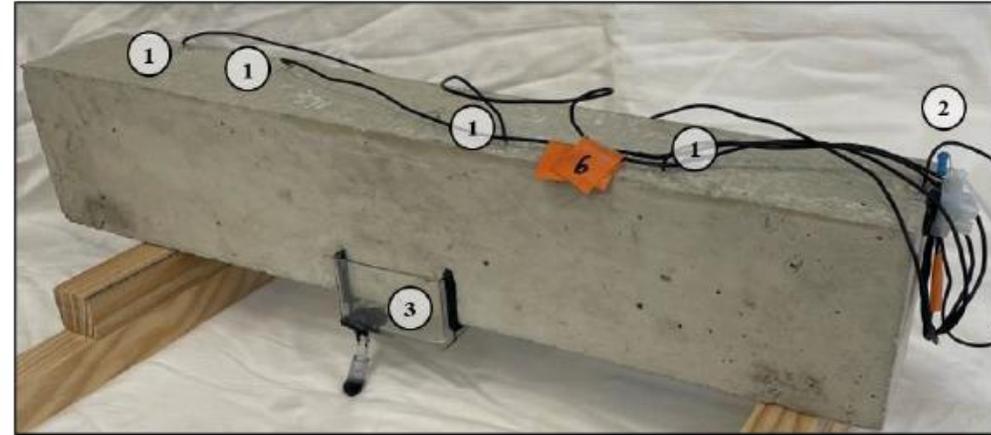
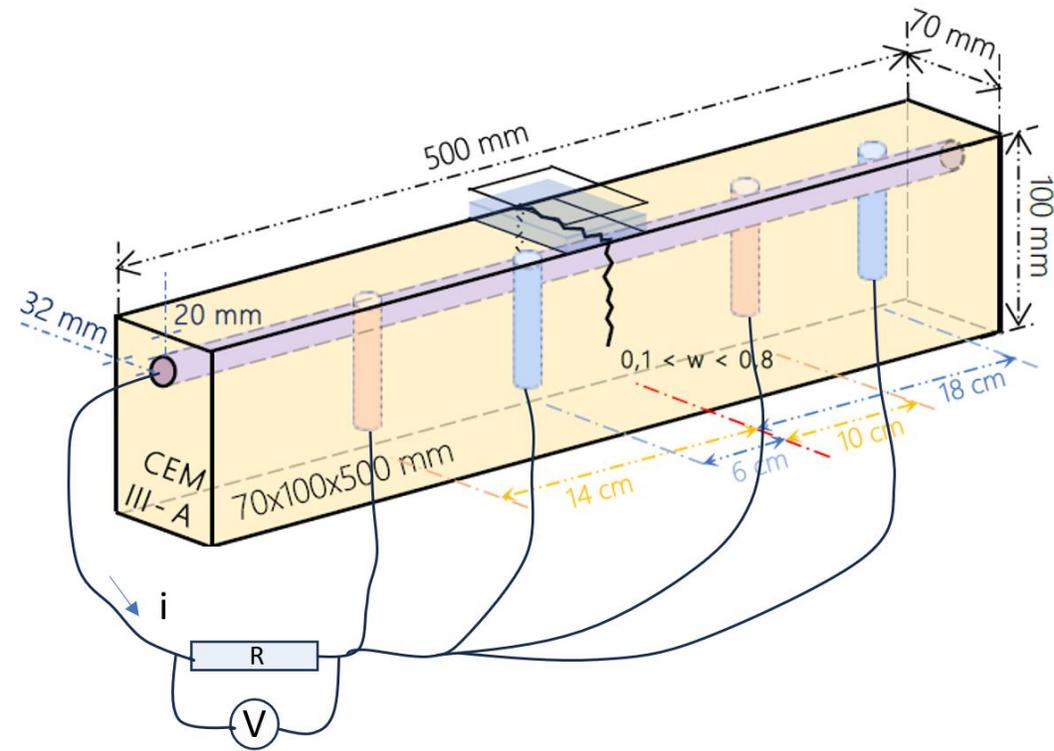
Les résultats montrent que la masse de fer perdue augmente avec l'ouverture de la fissure. En revanche, la cinétique de corrosion reste constante quelle que soit l'ouverture en raison de l'extension de la zone corrodée qui augmente elle-aussi avec l'ouverture de la fissure.

L'épaisseur de la couche de corrosion est fortement liée à la qualité de l'interface.

. La plus importante conclusion est que dans le cas d'un enrobage fissuré (<500 μm), la qualité de l'interface acier/liant conditionne la corrosion plus que l'ouverture de la fissure.



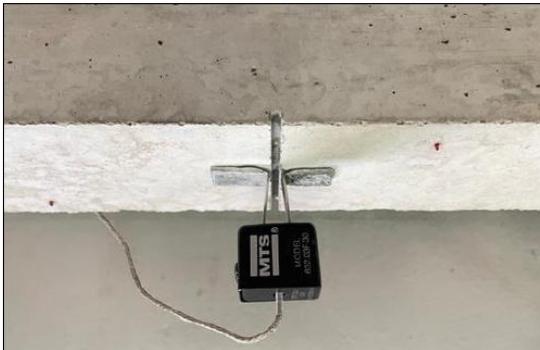
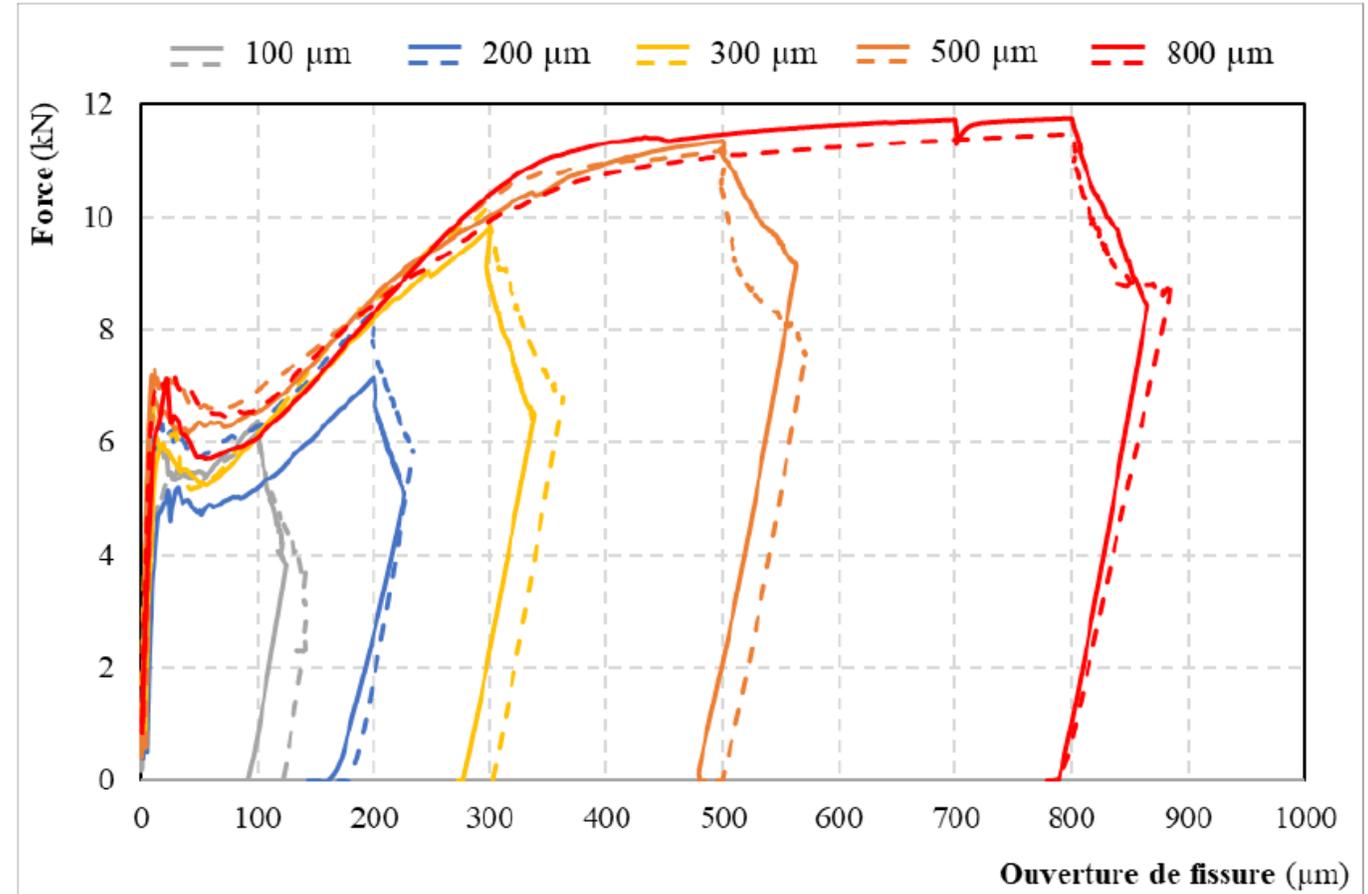
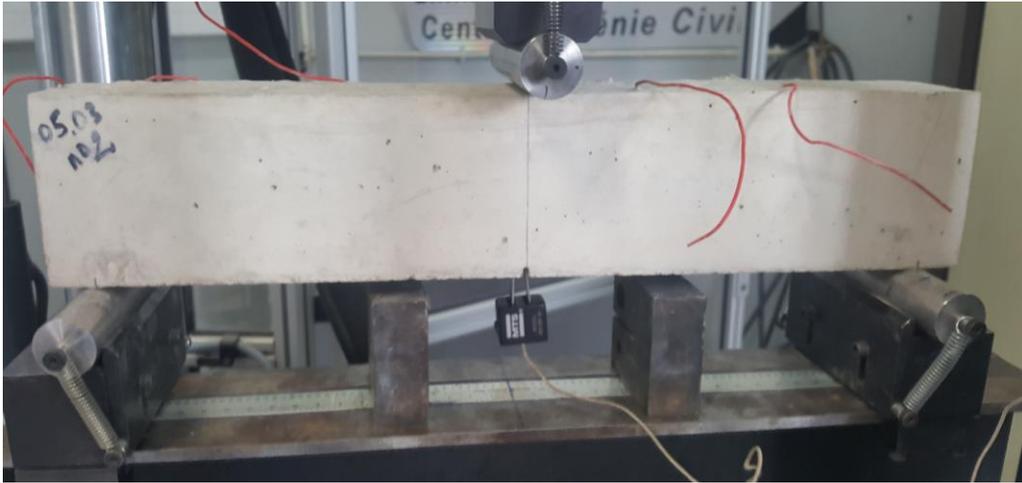
► Thèse Lucas HESS (LMDC – CEA 2024) – Cinétique de corrosion par chlorures



1	Résine époxy
2	Connexion électrique individuelle et autonome
3	Bac à chlorures – Apport localisé « DOWN »
3'	Bac à chlorures – Apport localisé « UP »
4	Uniformisation des durées d'écoulement



► Thèse Lucas HESS (LMDC – CEA 2024) – Cinétique de corrosion par chlorures

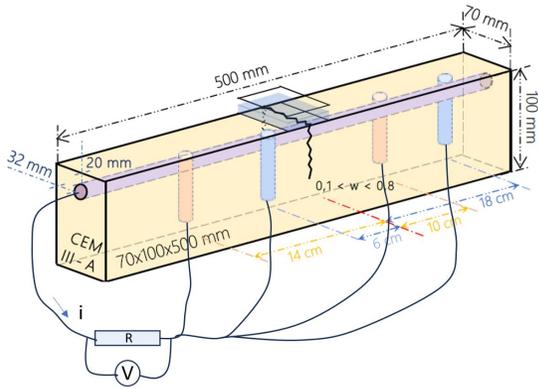


► Mesure et intégration de courant de corrosion dus aux chlorures

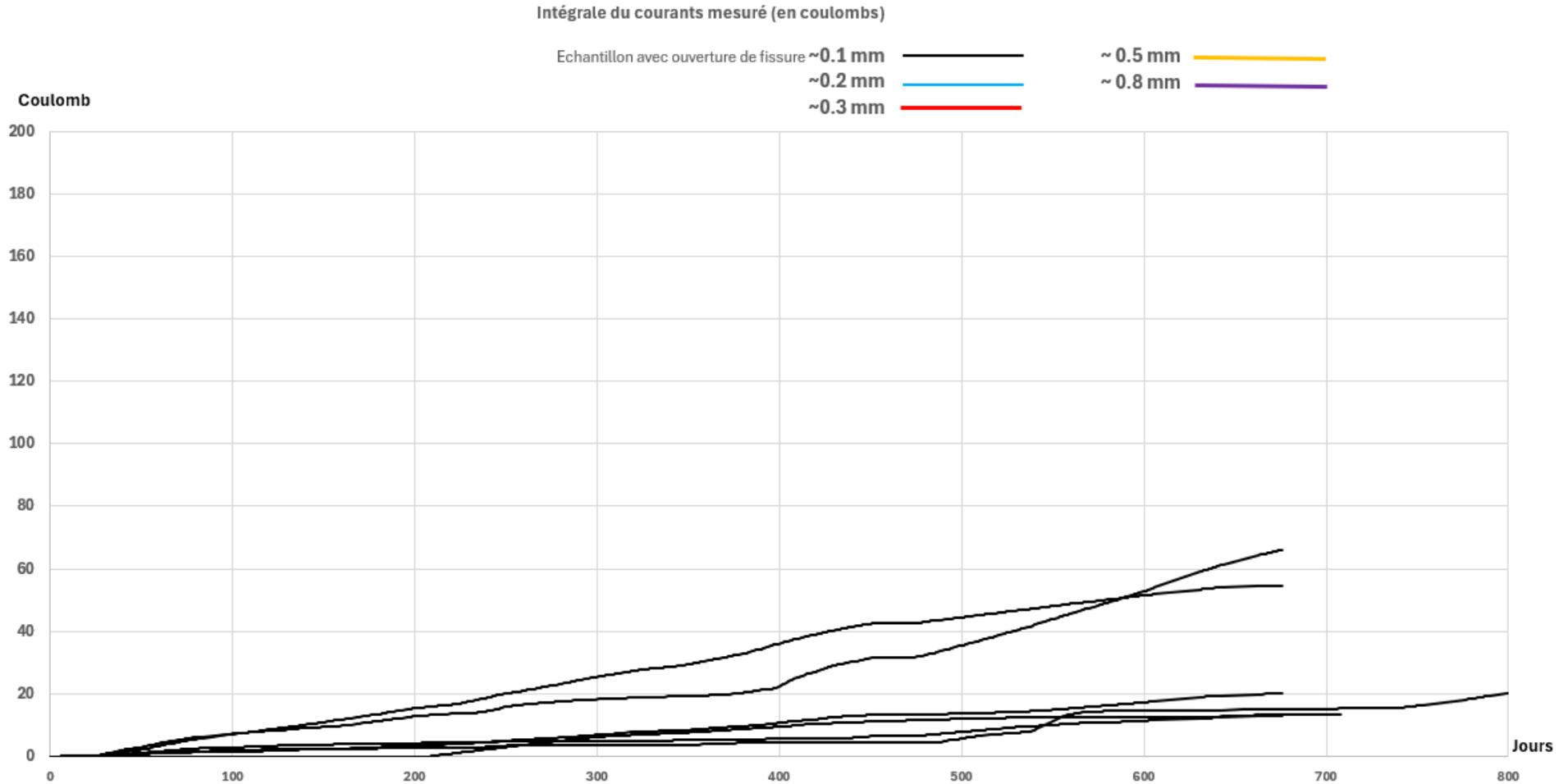
Echantillon étudiés au
LMDC à Toulouse
Mesures de courant de
corrosion



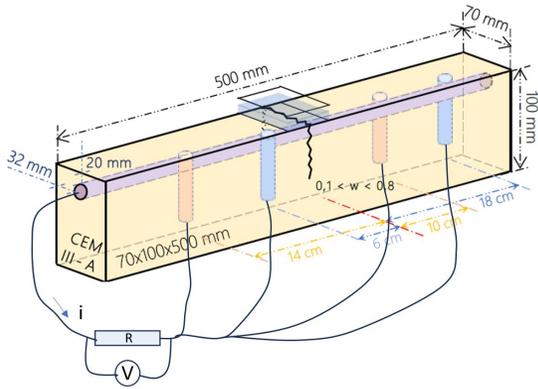
► Mesure et intégration de courant de corrosion dus aux chlorures



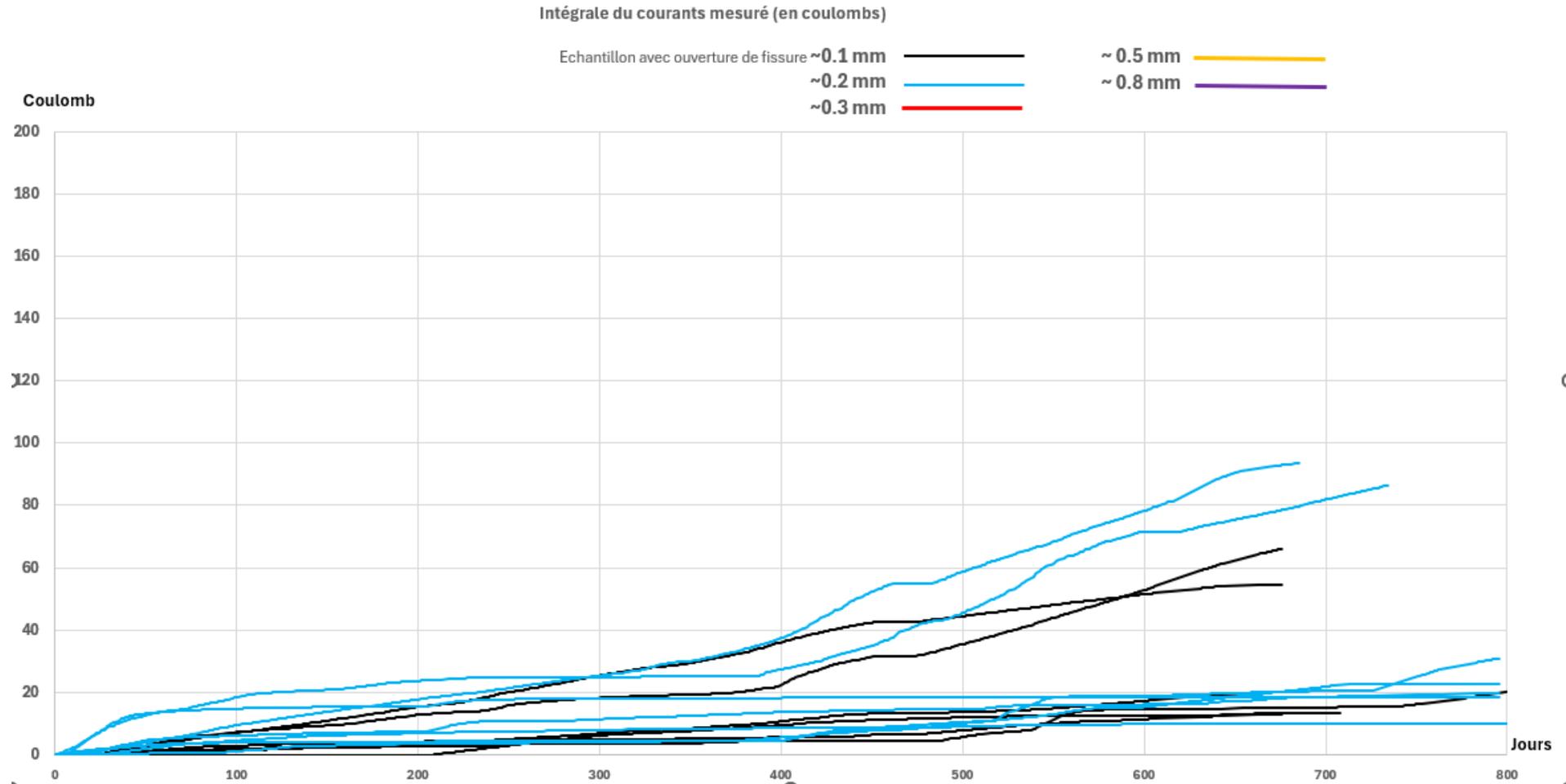
L'intégrale du courant $i=V/R$ renseigne sur la quantité de fer dissout par corrosion.
 Sachant que l'on ne mesure qu'une partie du courant (~ 30/35%)
100 Coulombs ~ 10 mm³ Fe



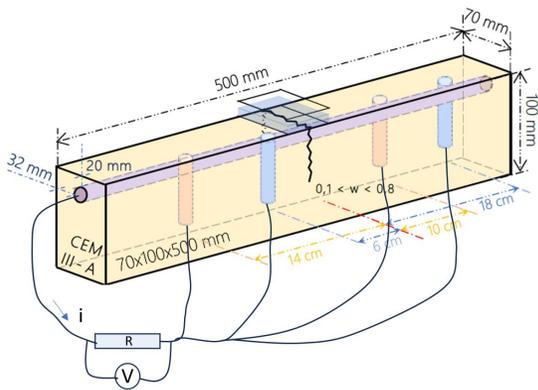
► Mesure et intégration de courant de corrosion dus aux chlorures



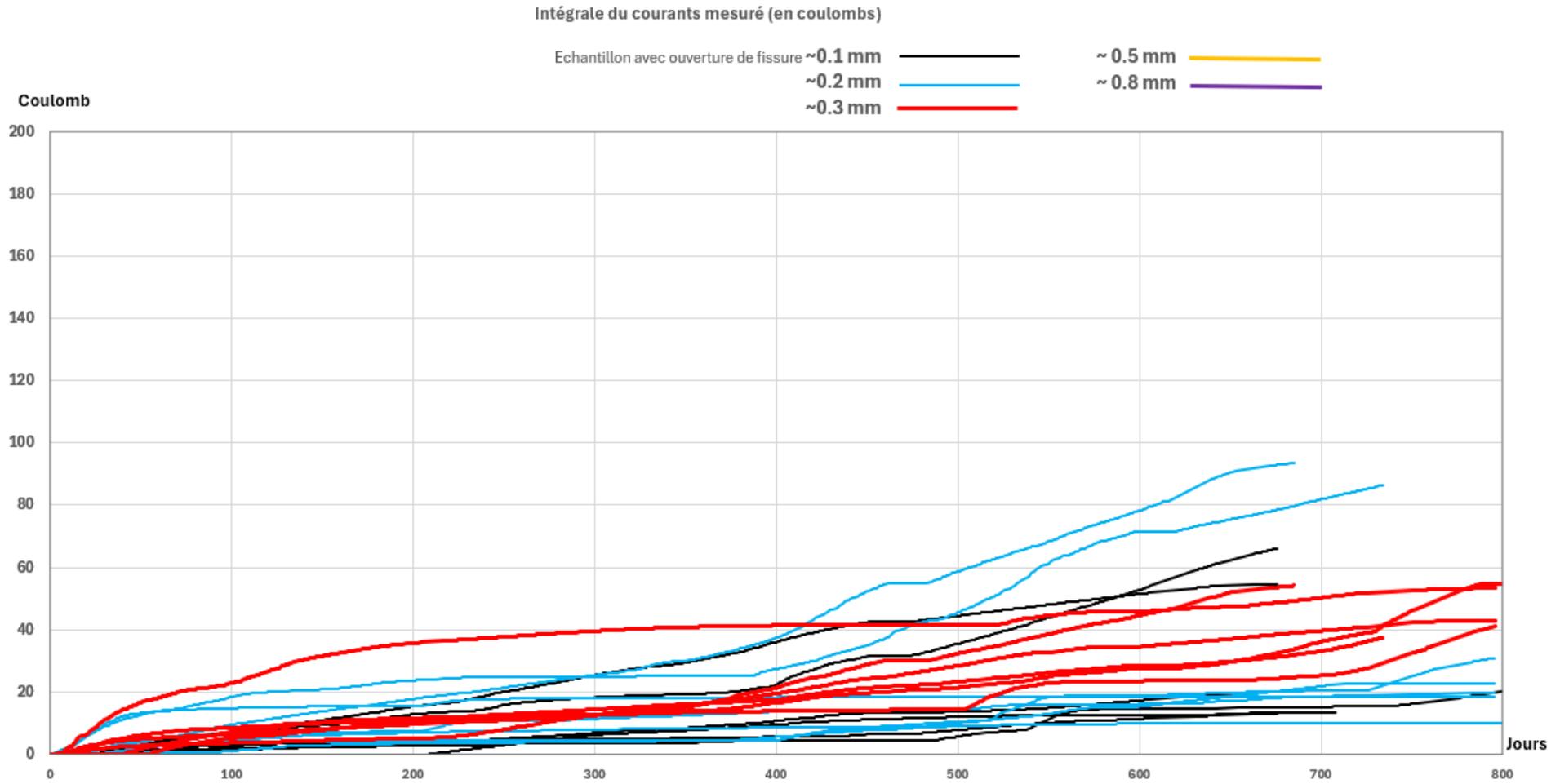
L'intégrale du courant $i=V/R$ renseigne sur la quantité de fer dissout par corrosion.
 Sachant que l'on ne mesure qu'une partie du courant (~ 30/35%)
100 Coulombs ~ 10 mm³ Fe



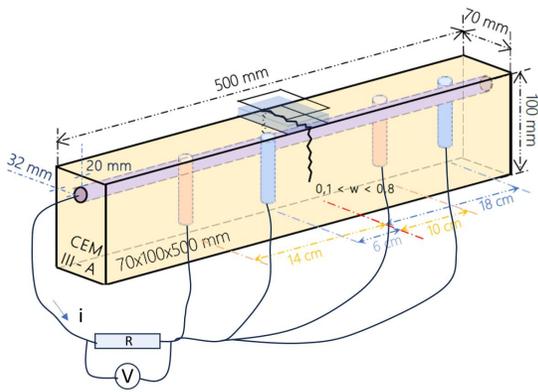
► Mesure et intégration de courant de corrosion dus aux chlorures



L'intégrale du courant $i=V/R$ renseigne sur la quantité de fer dissout par corrosion.
 Sachant que l'on ne mesure qu'une partie du courant (~ 30/35%)
100 Coulombs ~ 10 mm³ Fe

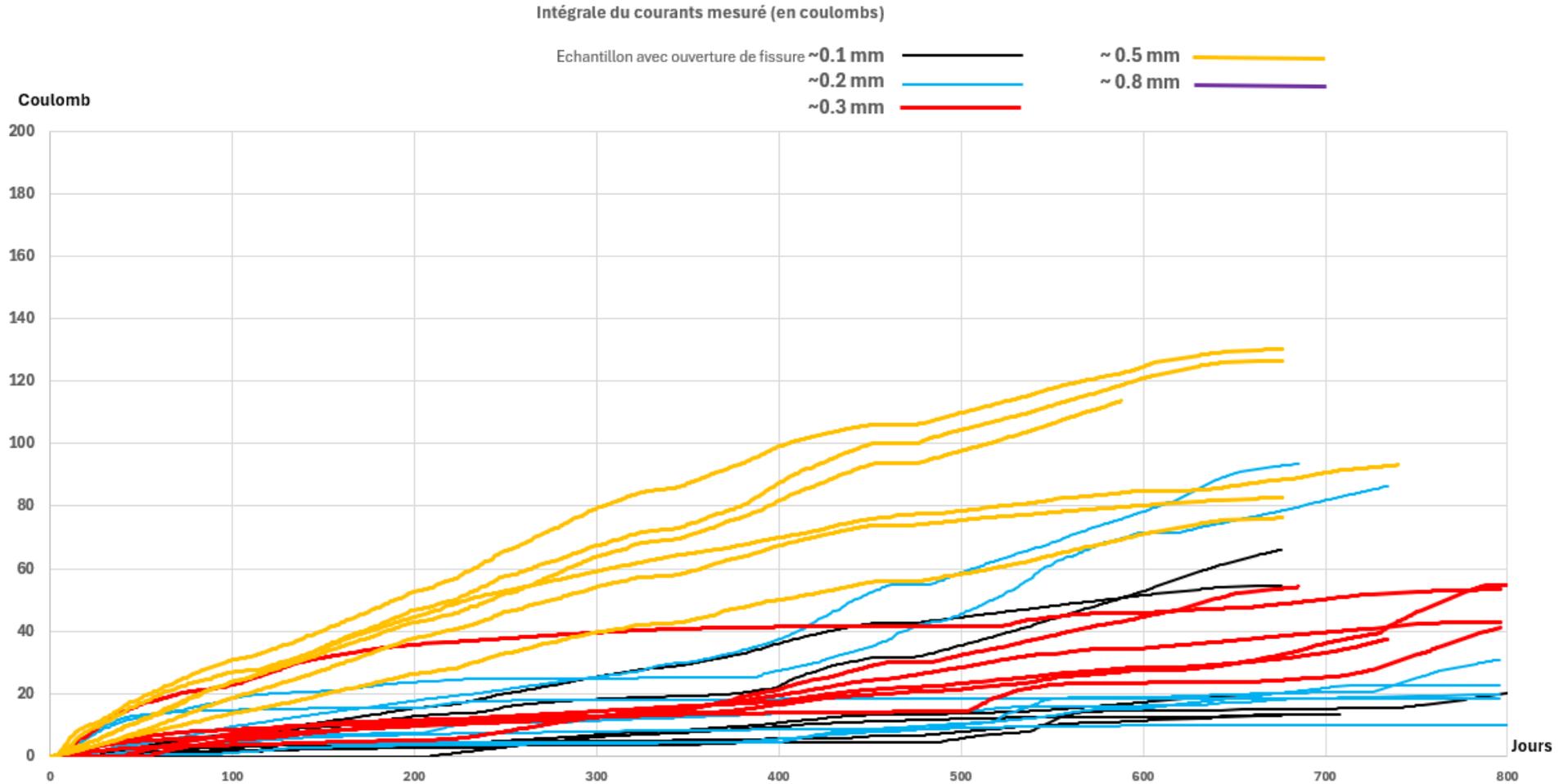


► Mesure et intégration de courant de corrosion dus aux chlorures

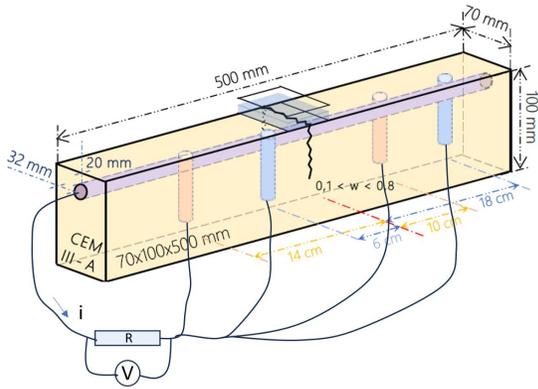


L'intégrale du courant $i=V/R$ renseigne sur la quantité de fer dissout par corrosion.

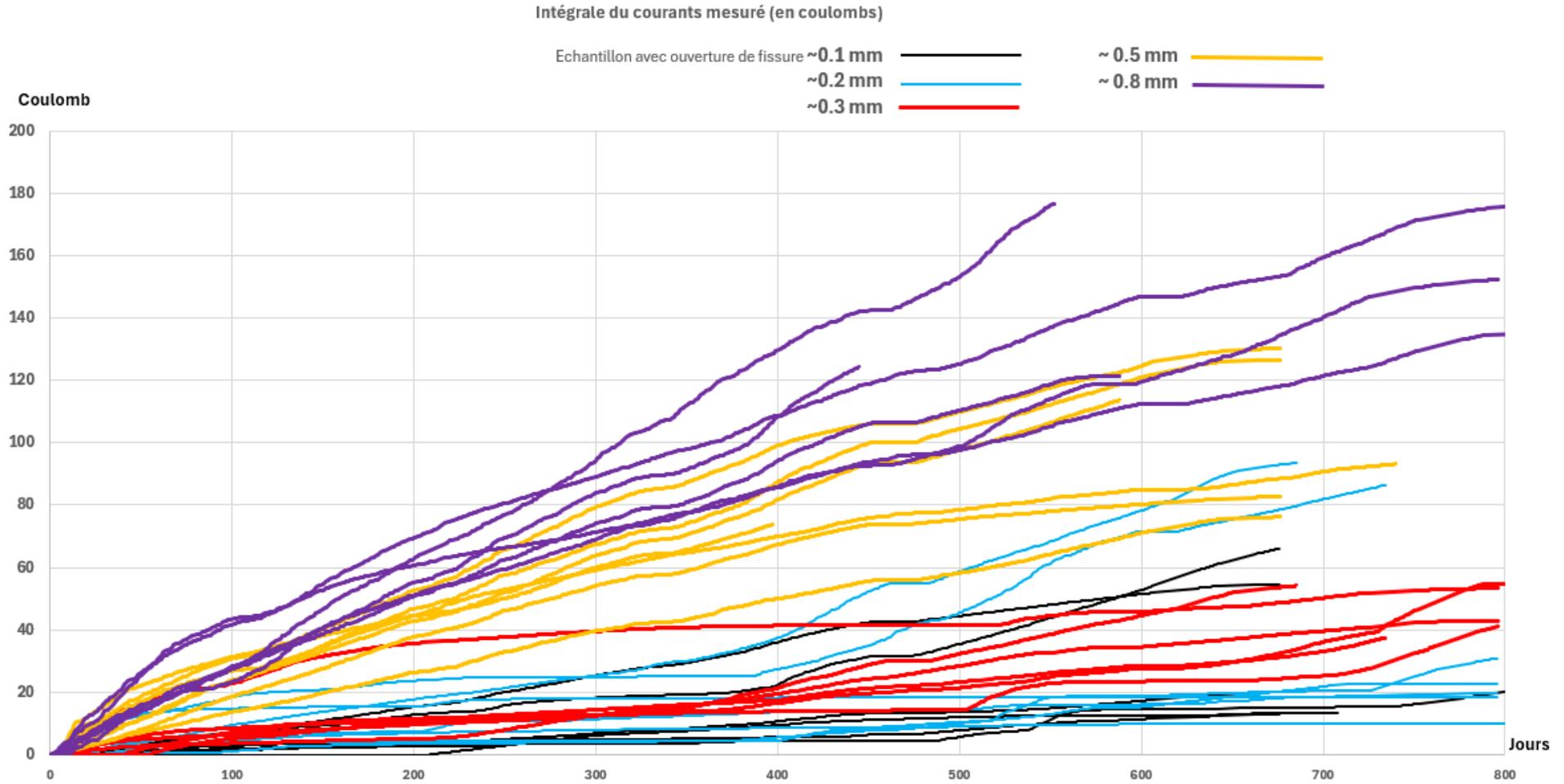
Sachant que l'on ne récupère qu'une partie du courant (env. 35%) on a **100 Coulomb $\sim 10 \text{ mm}^3 \text{ Fe}$**



► Mesure et intégration de courant de corrosion dus aux chlorures



L'intégrale du courant $i=V/R$ renseigne sur la quantité de fer dissout par corrosion.
 Sachant que l'on ne mesure qu'une partie du courant (~ 30/35%)
100 Coulombs ~ 10 mm³ Fe



► CONCLUSIONS

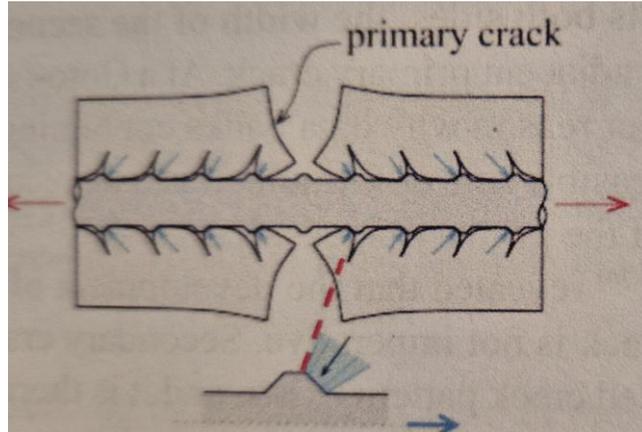
En présence de chlorure : Si les quantités de fer dissoutes ont tendance à augmenter en **moyenne avec l'ouverture de la fissure**, ces quantités **sont dispersées** et, pour les ouvertures de 0,1, 0,2 et 0,3 mm, les **quantités maximales de fer dissout** observées sur échantillon individuel ne correspondent pas aux **ouvertures** en surface **les plus importantes**.

Résultats à confirmer sur d'autres éprouvettes de tailles diverses avec divers bétons, diverses géométries et divers modes d'agression



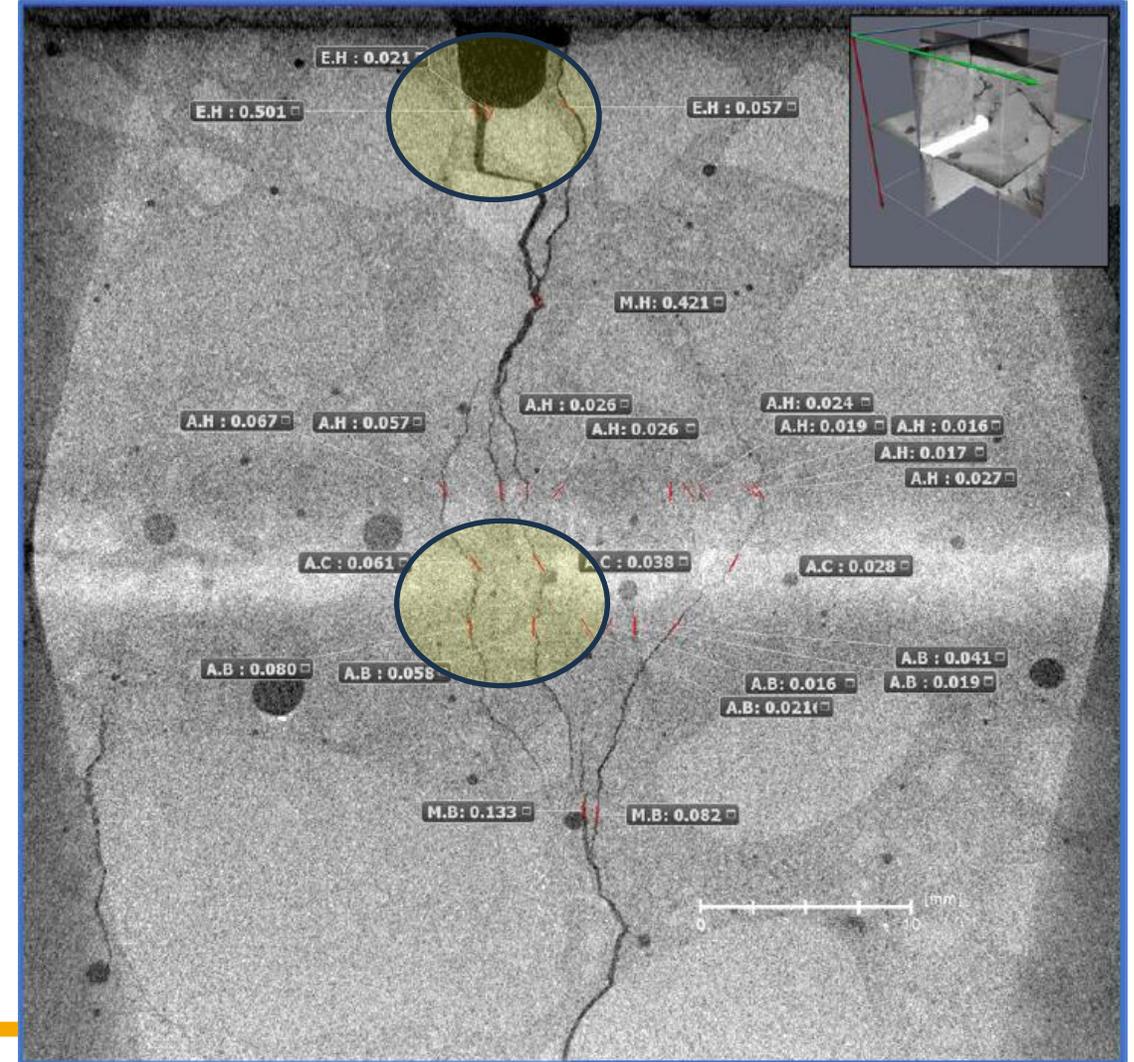
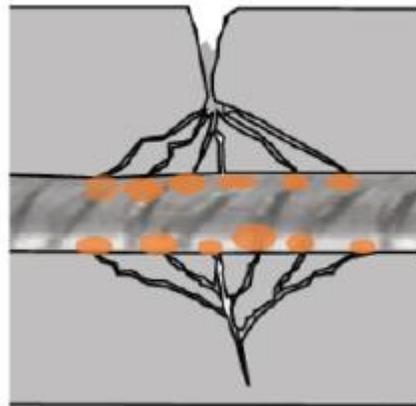
► Faciès de fissure Observés en Microtomographie X (plan de coupe vertical)

Vision classique de la fissure



Bulletin fib 114 – Background document of fib Model code 2020 – Nov 2024

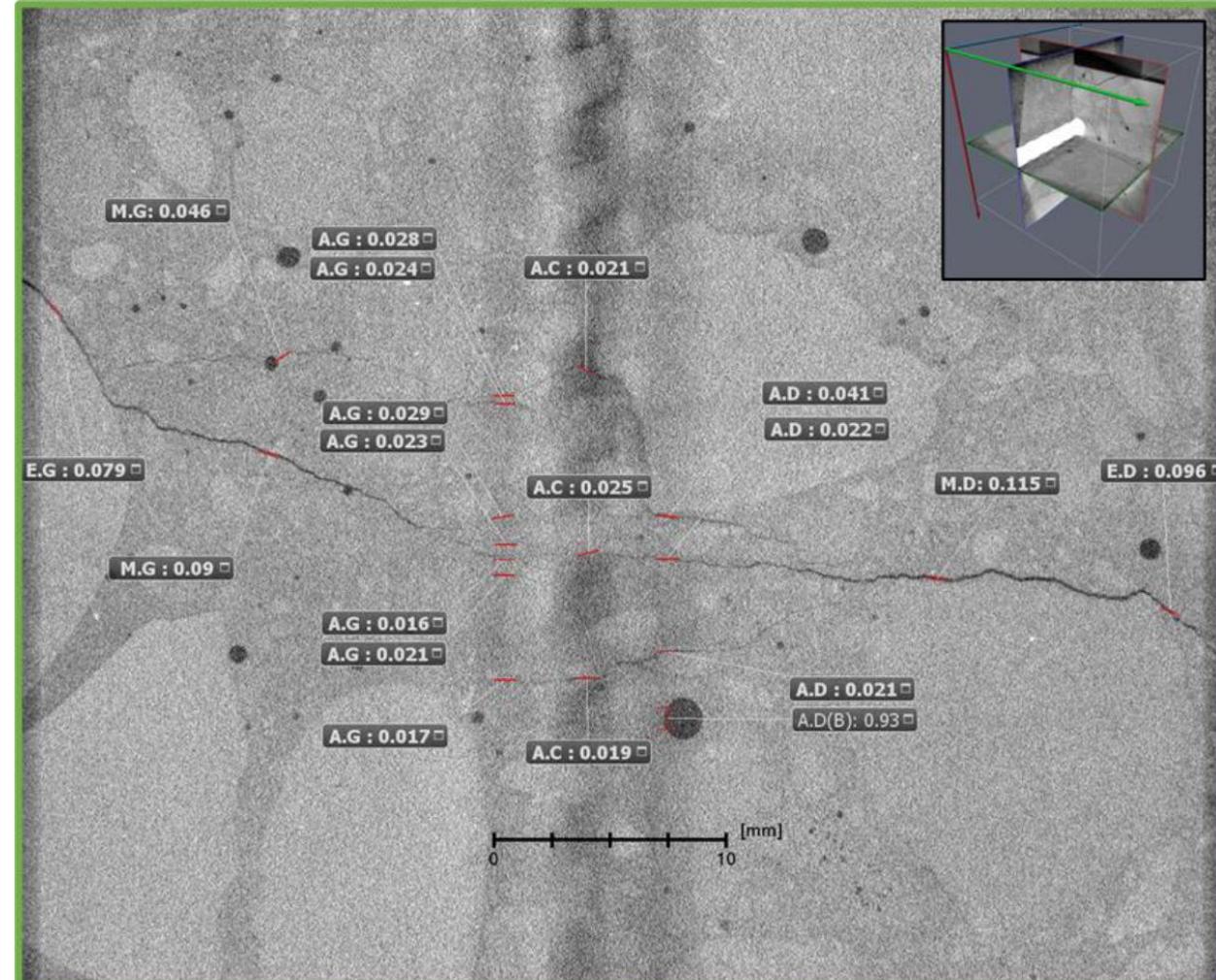
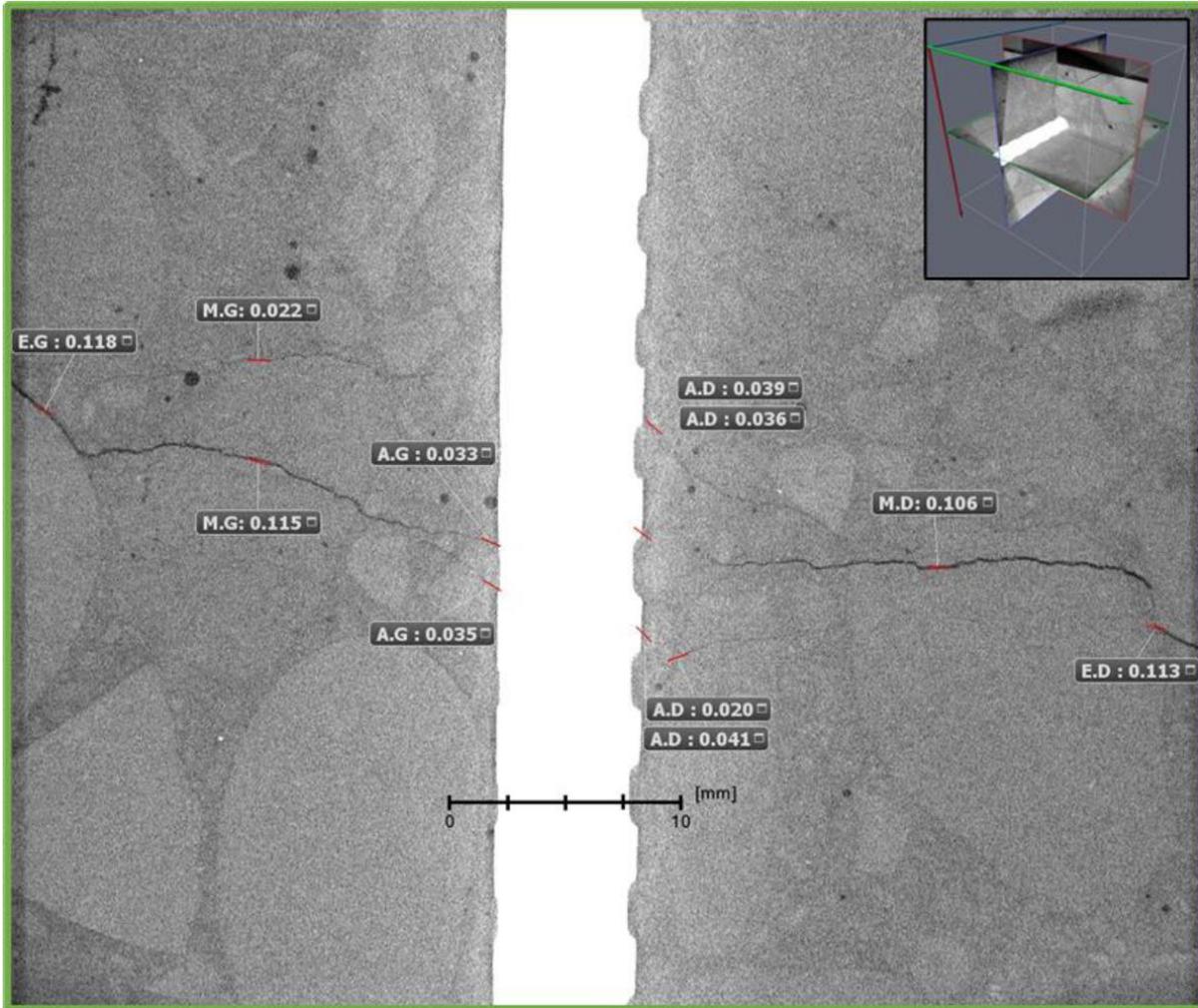
Vision plus réaliste des ramifications existant au niveau de l'armature

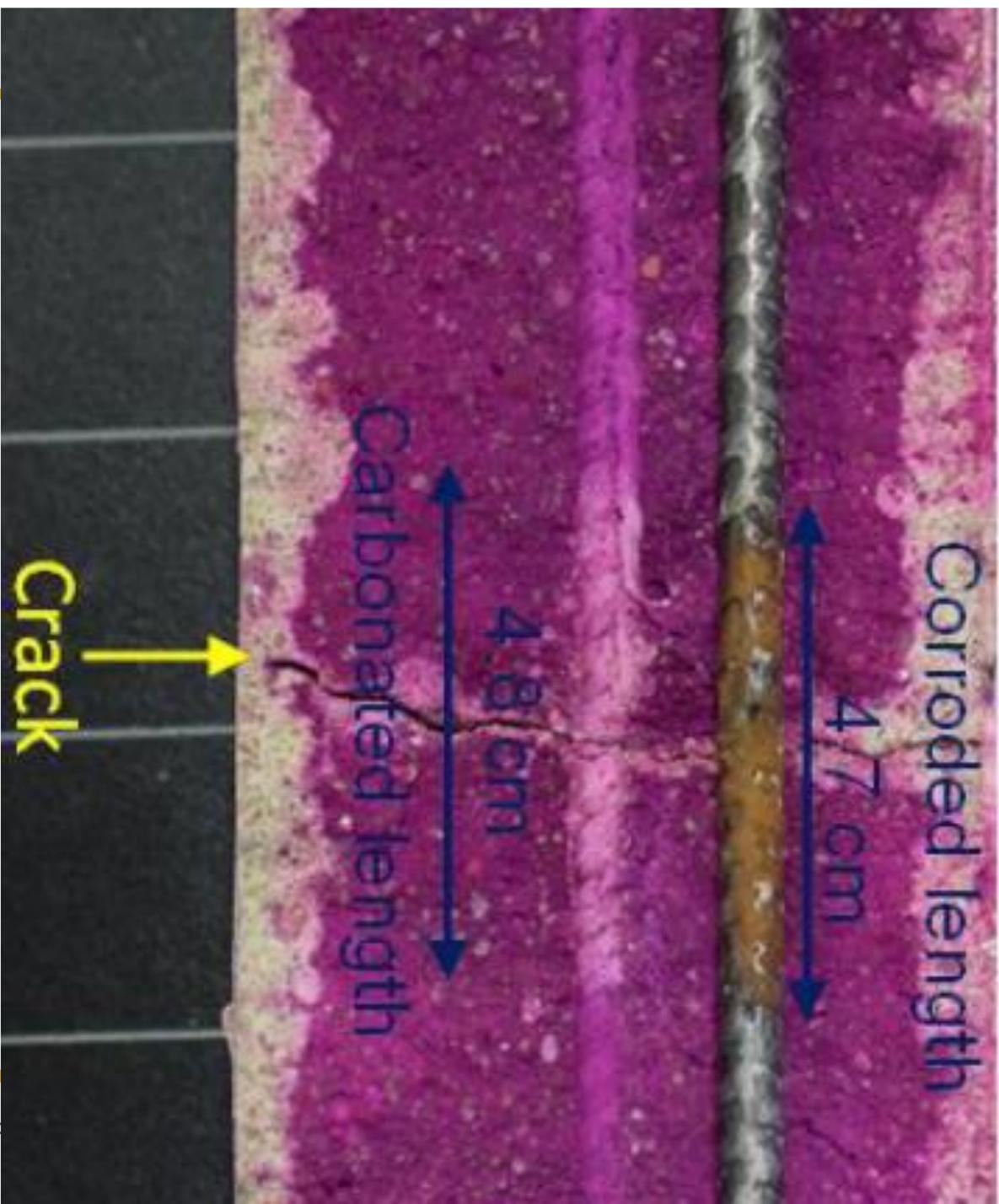


Micro-Tomographie X (CEA)

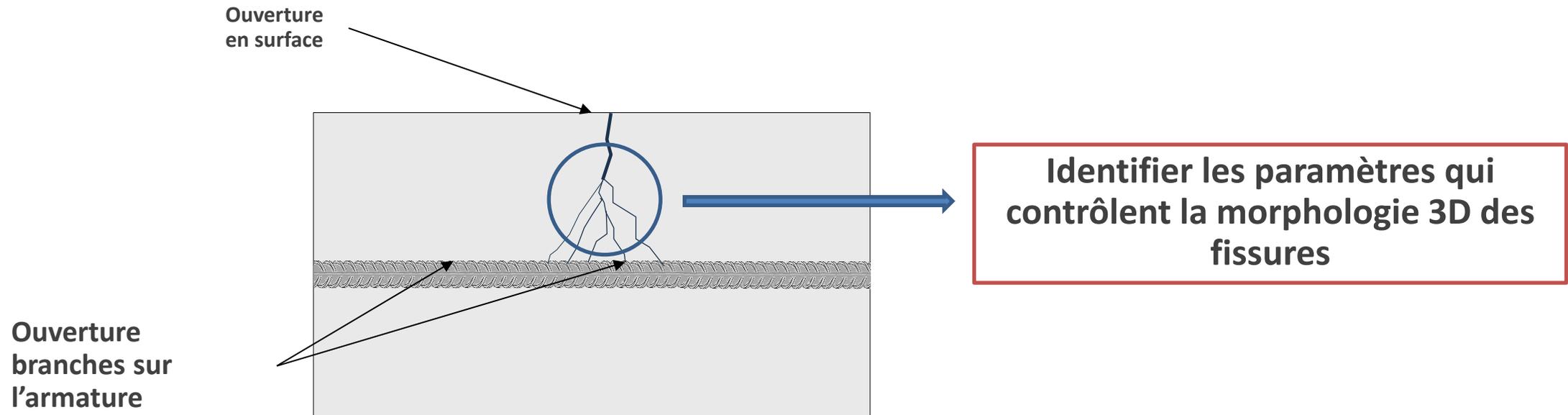


► Faciès de fissure - plan de coupe Horizontal





- CONCLUSION : Faut-il changer complètement la vision que l'on a de la fissure au voisinage de l'armature ?



"If there is to be a link between crack width and corrosion activity, it can only be with the crack width present at the steel-concrete interface." Beeby.



- Le démarrage de la corrosion est systématique et quasi instantané (à l'échelle de la durée de vie de la structure) quel que soit l'ouverture de fissure

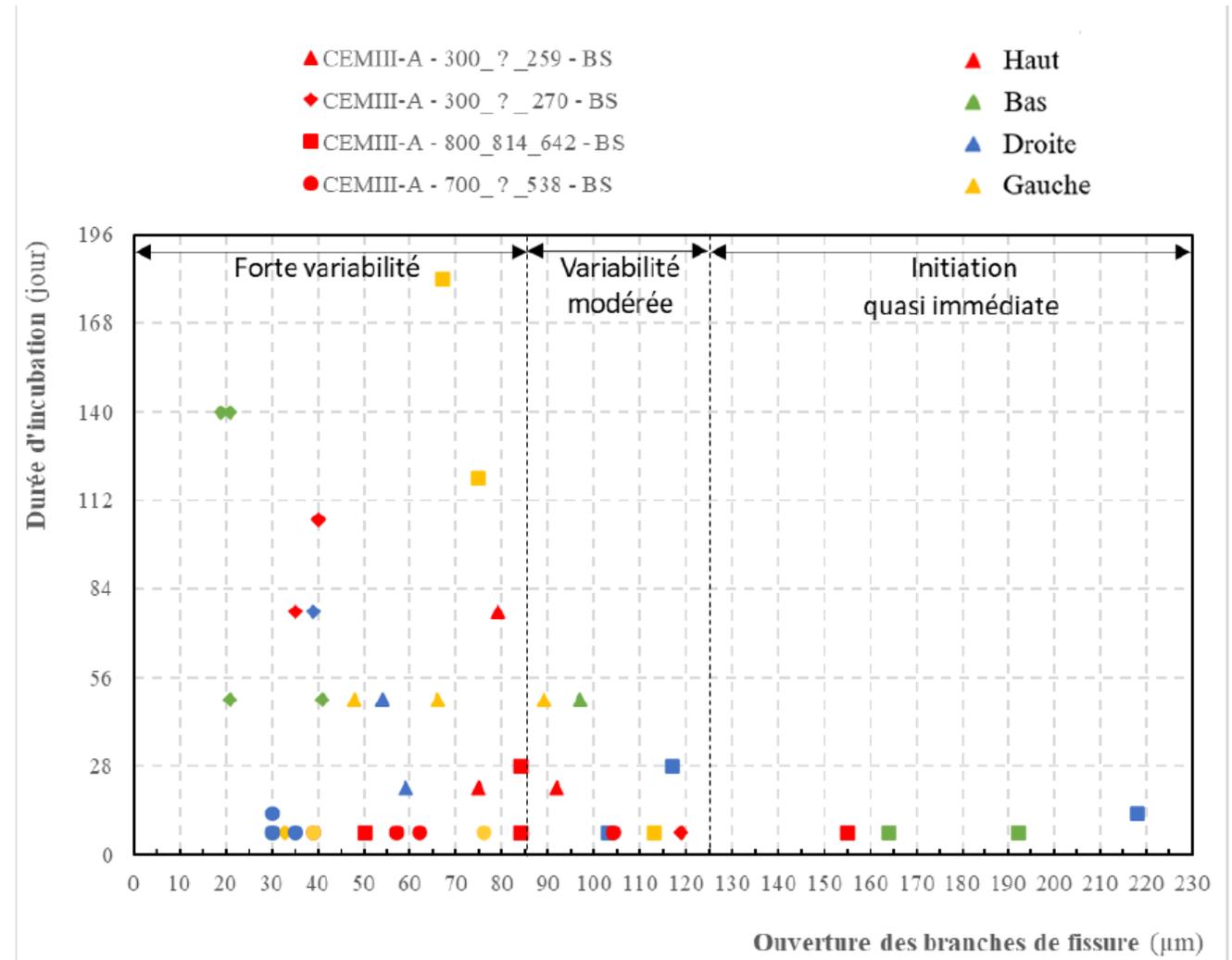


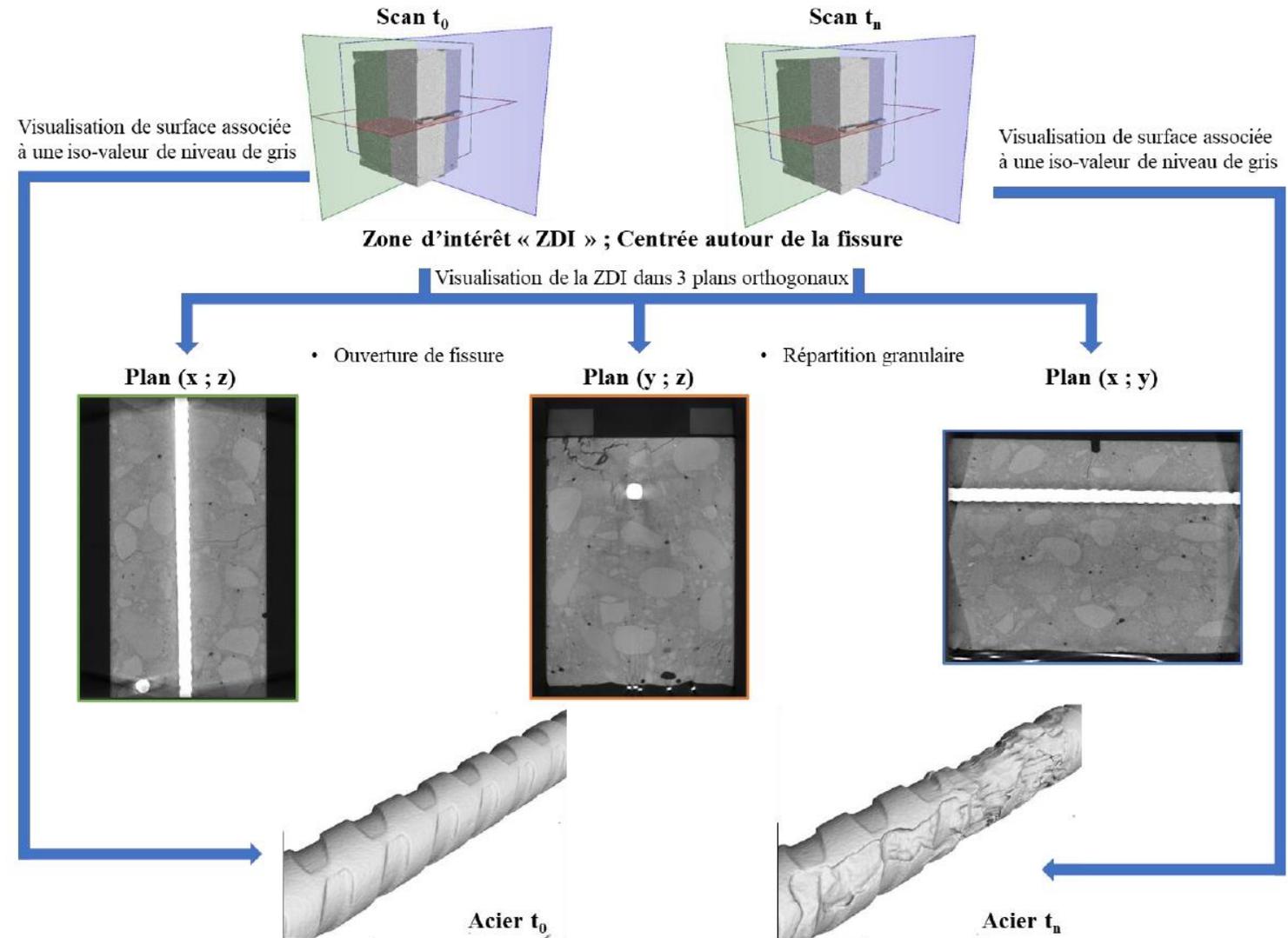
Figure IV-54 : Durée d'incubation avant la formation d'un site actif, en fonction de l'ouverture des branches des fissures et de leur orientation.



- Mesures directes et non destructive de la localisation et des quantités de fer dissoute

Suivi dans le temps l'évolution de la corrosion et l'extension de la zone anodique et mesure très précise des densités de courant (voxel $\sim 60 \mu\text{m}$)

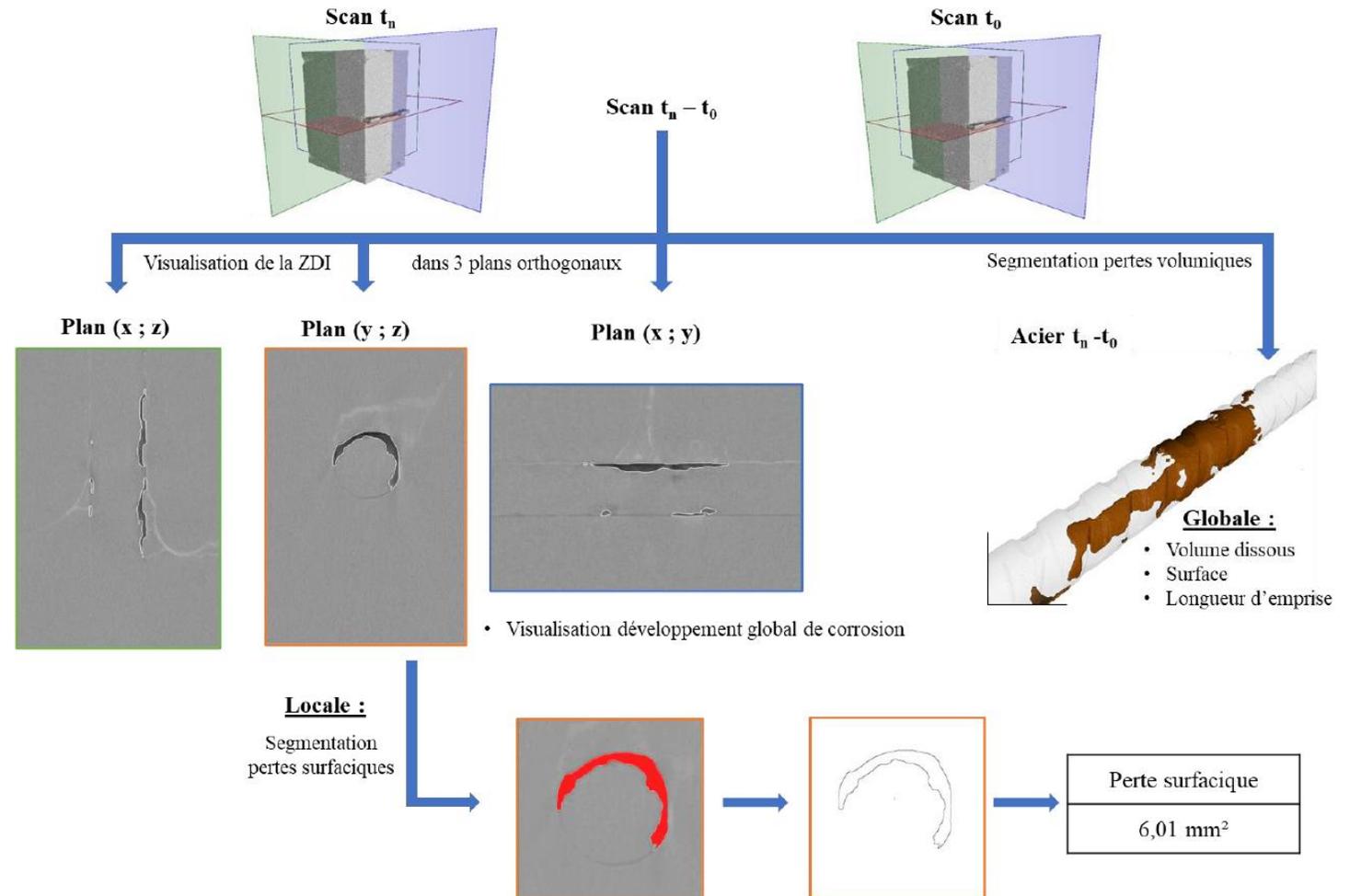
⇒ Possibilité de comparer précisément les courants mesurés et les quantités dissoutes



- Mesures directes et non destructive de la localisation et des quantités de fer dissoute

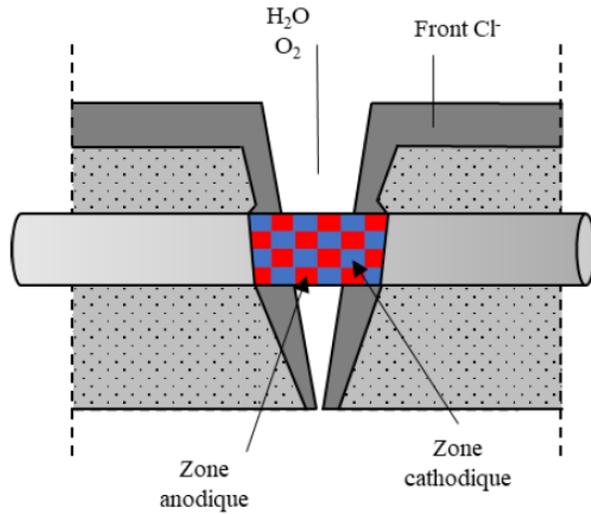
Suivi dans le temps l'évolution de la corrosion et l'extension de la zone anodique et mesure très précise des densités de courant (voxel $\sim 60 \mu\text{m}$)

⇒ Possibilité de comparer précisément les courants mesurés et les quantités dissoutes



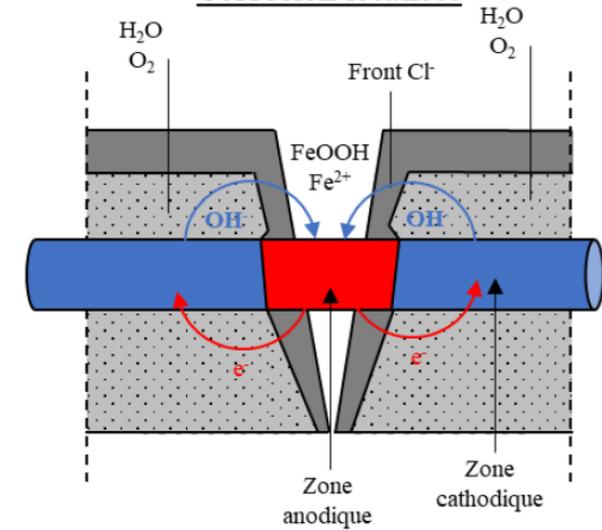
► Type de corrosion prédominante en présence de chlorures

Corrosion uniforme



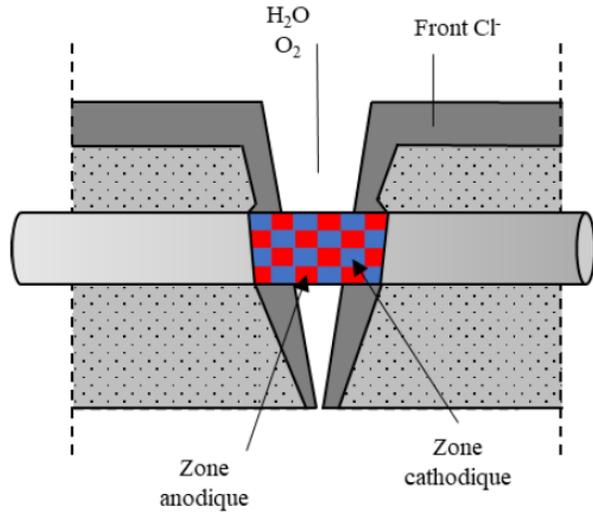
OU ?

Macro-pile
Corrosion localisée

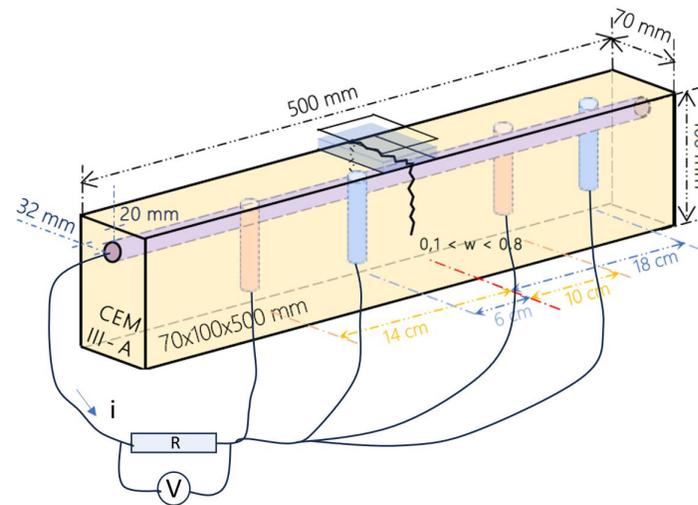


► Type de corrosion prédominante en présence de chlorures

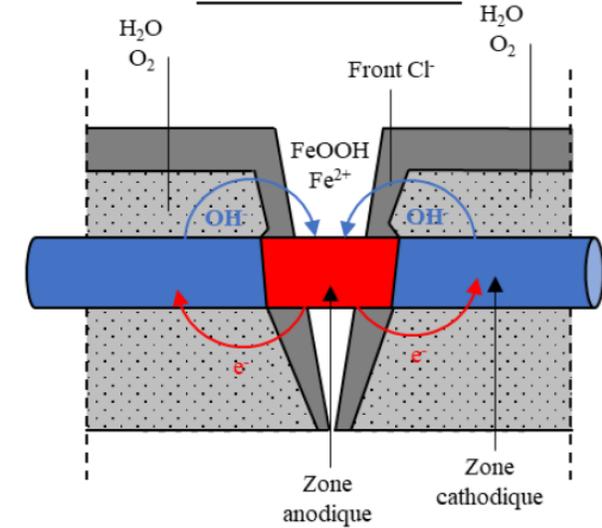
Corrosion uniforme



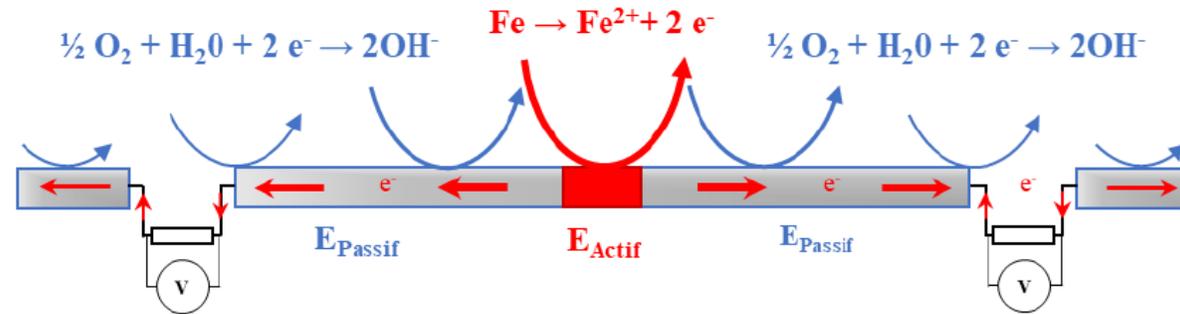
Dispositif expérimental



Macro-pile
Corrosion localisée

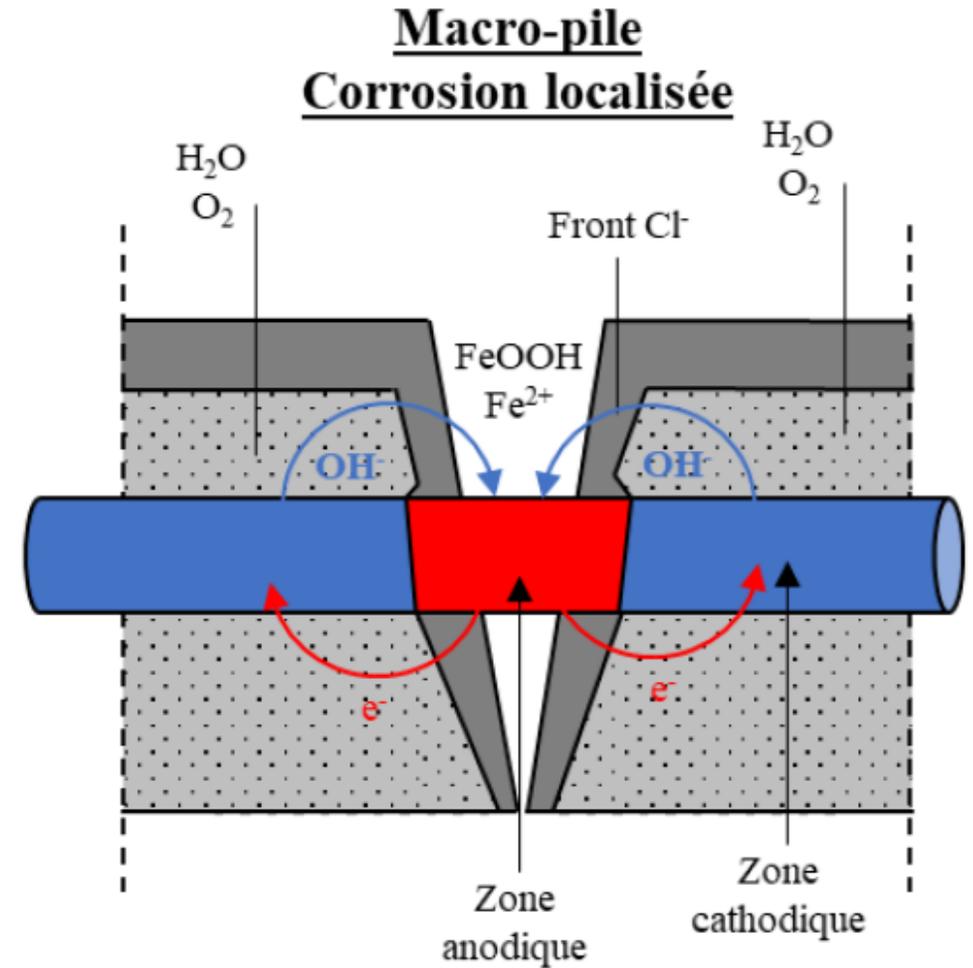
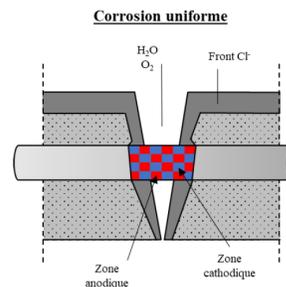


Le dispositif expérimental ne mesure que les courants de MACRO-PILE ... et seulement une fraction de ces courants



► CONCLUSION en présence de chlorures

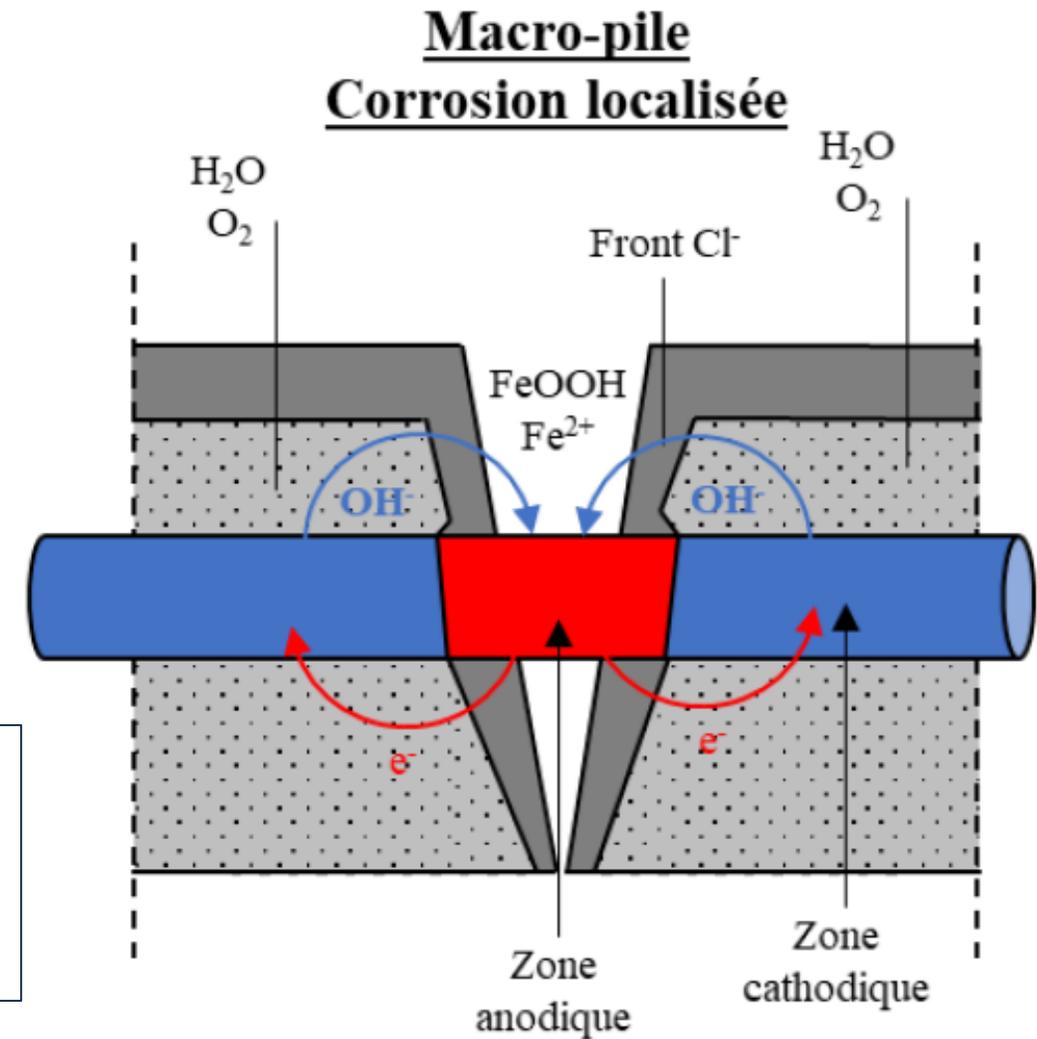
Le mécanisme très prépondérant
sinon unique
est celui de Macropile



► CONCLUSION en présence de chlorures

Pour être solide et opposable,
ce résultat fondamental
doit être confirmé pour d'autres
configurations et mode
d'agression

Nota: Pour la carbonatation, les deux mécanismes
coexistent avec probablement une prévalence du
mode "**corrosion uniforme**"



Pénétration des chlorures perpendiculairement a une fissure

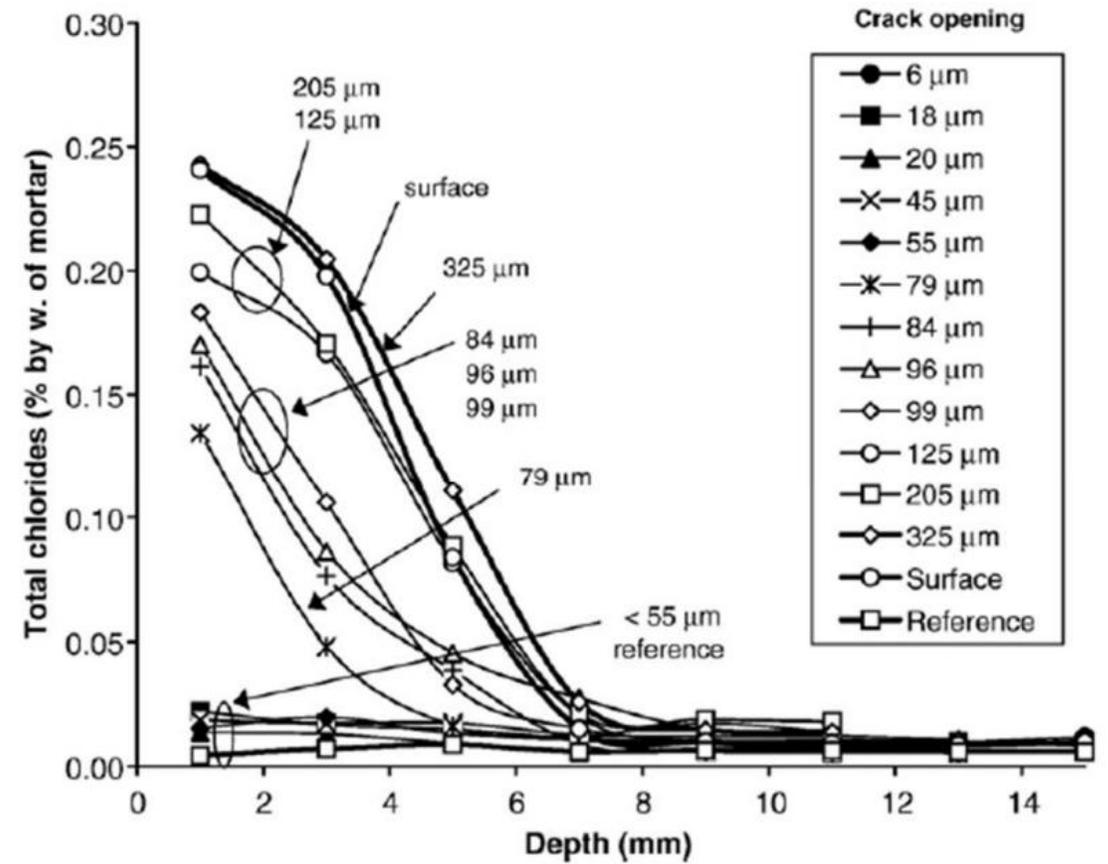
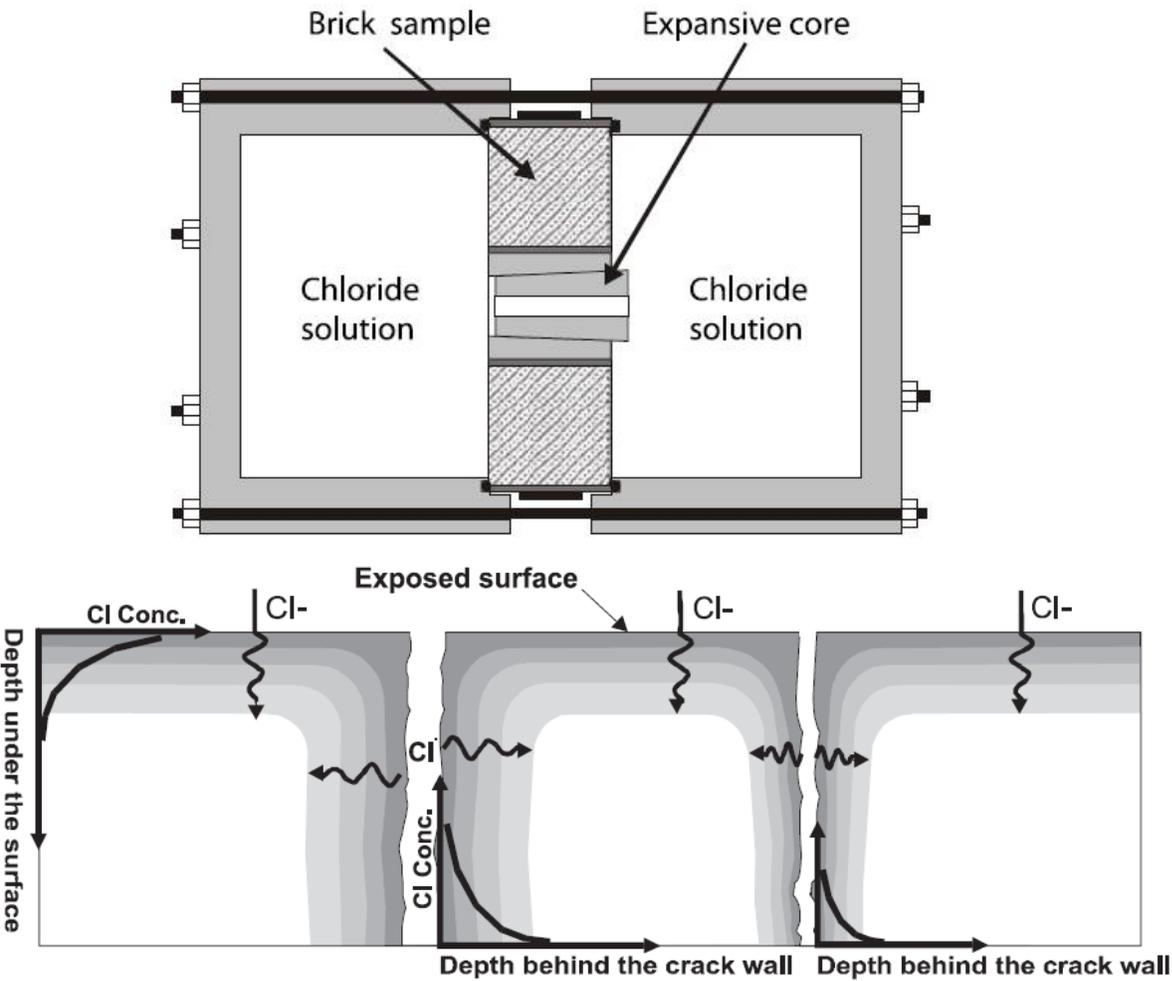


Fig. 5. Perpendicular-to-crack chloride penetration profiles, surface profile and reference profile in samples cracked at the age of 28 days.



OBJECTIFS DU PN

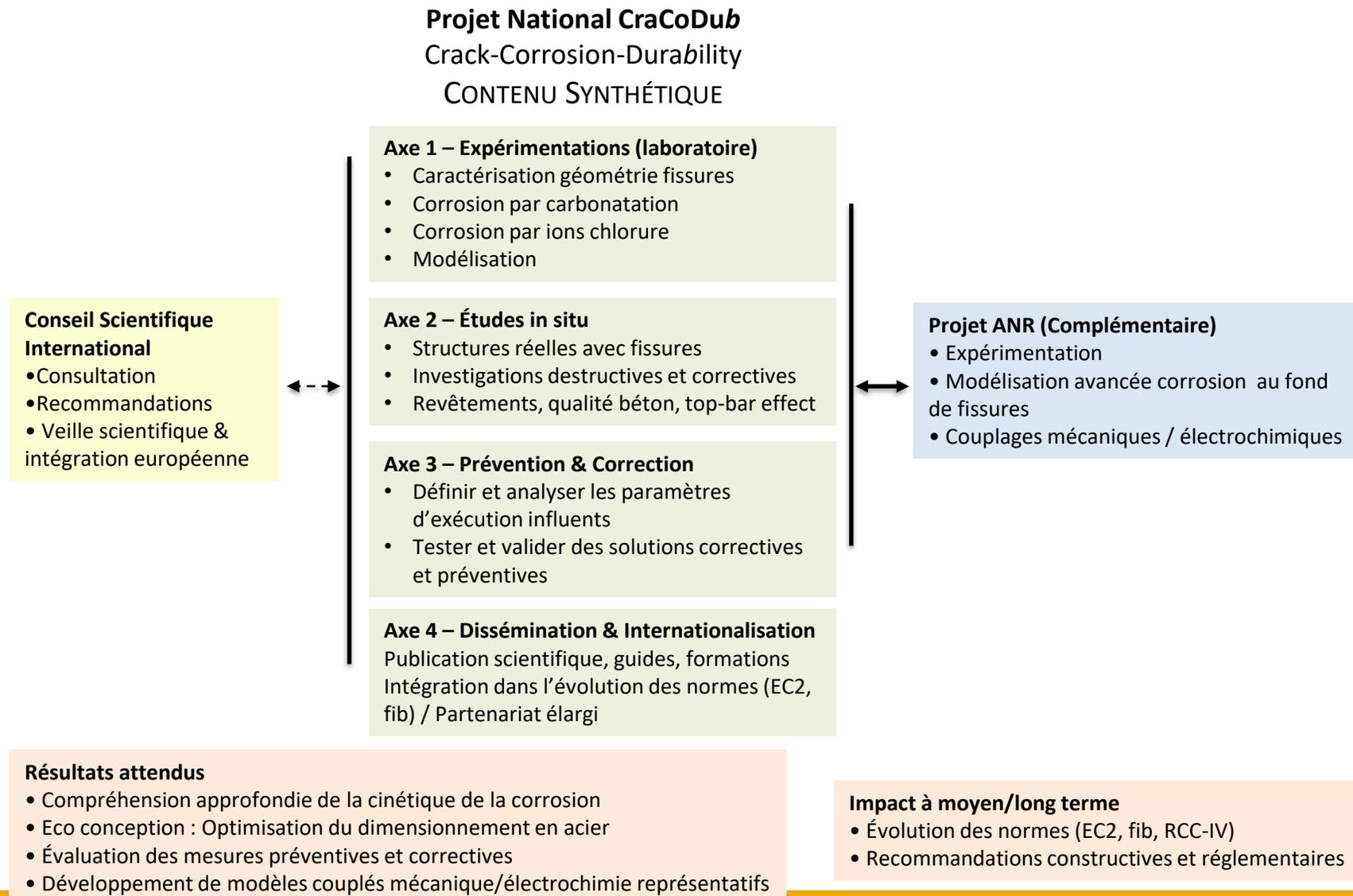
- ▶ Mieux comprendre la géométrie des fissures au voisinage des armatures
- ▶ Mieux comprendre les mécanismes pilotant l'évolution de la corrosion en fond de fissure? en présence de chlorure ou de carbonatation.
- ▶ Identifier et quantifier les facteurs influençant dans un sens ou dans l'autre cette évolution
- ▶ Identifier, élaborer et (pré)évaluer des stratégies et techniques permettant d'assurer la durabilité des structures à moindre impact environnemental et coût financier.
- ▶ Fournir des résultats suffisamment solides et confirmés pour faire évoluer efficacement les normes exploiter au mieux les résultats du PN

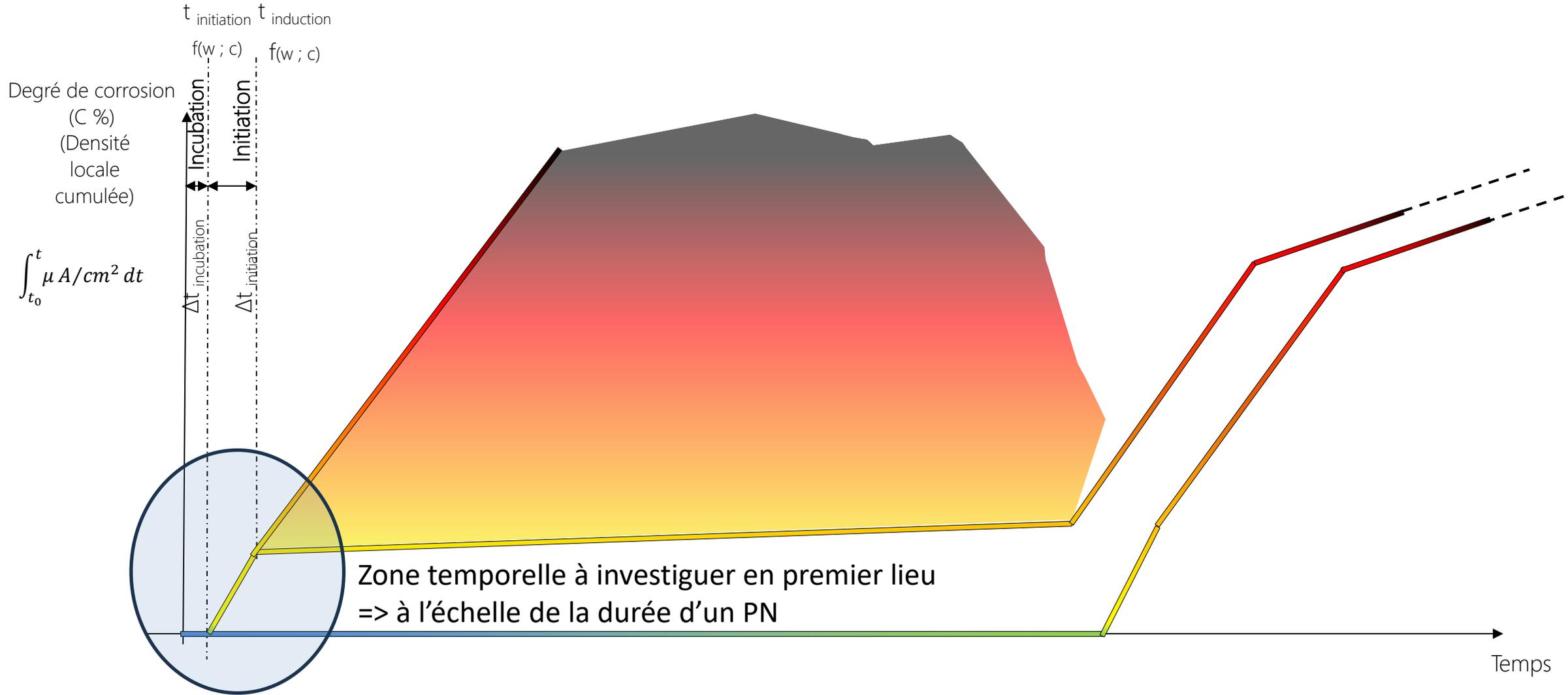


METHODOLOGIE

- ▶ Rester au plus près du réel dans le montage des essais
 - Méthodologie de création et de maintien des fissures
 - Choix de matériaux représentatifs des bétons modernes
 - Corrosion aussi « naturelle » que possible
- ▶ Comparer les résultats de laboratoire au réel (structures in situ)
- ▶ Multiplier les essais pour couvrir largement le champ des possibles
- ▶ S'entourer d'experts internationaux pour avoir un accès direct aux travaux et backgrounds international et faciliter la dissémination







PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

Dispositif Projet National (PN)

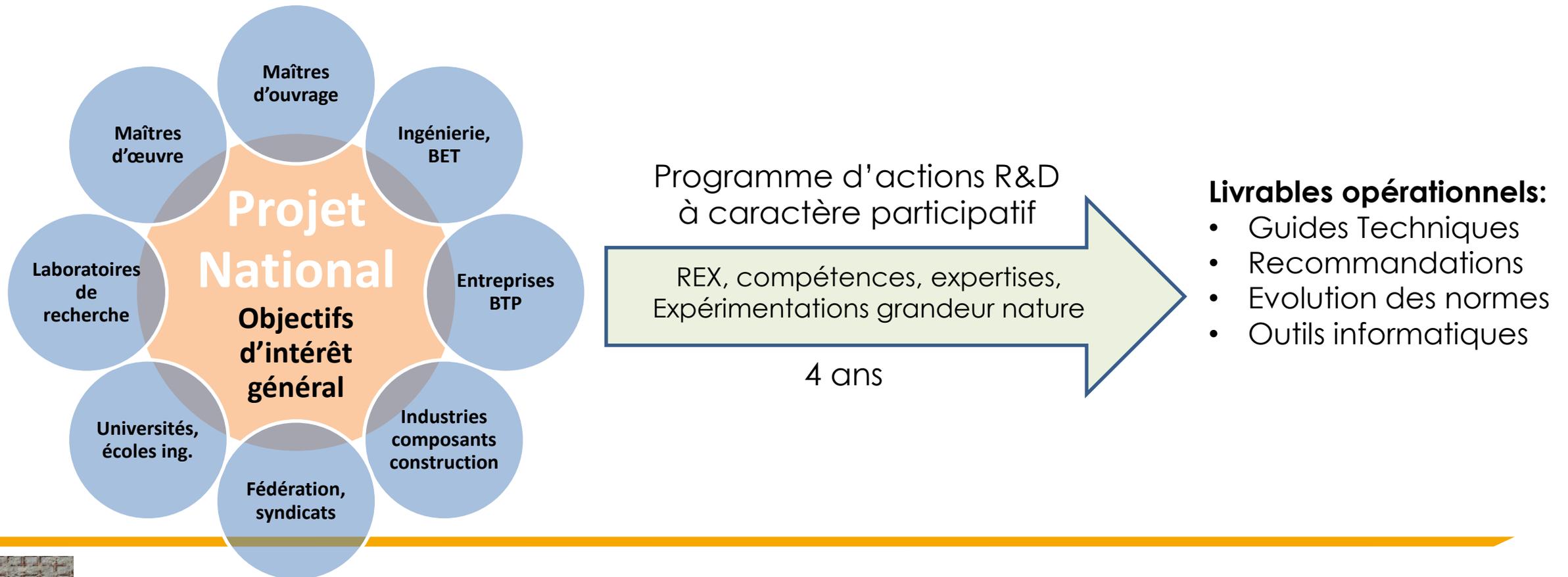
Camilo Durán

Responsable Scientifique et Technique (IREX)

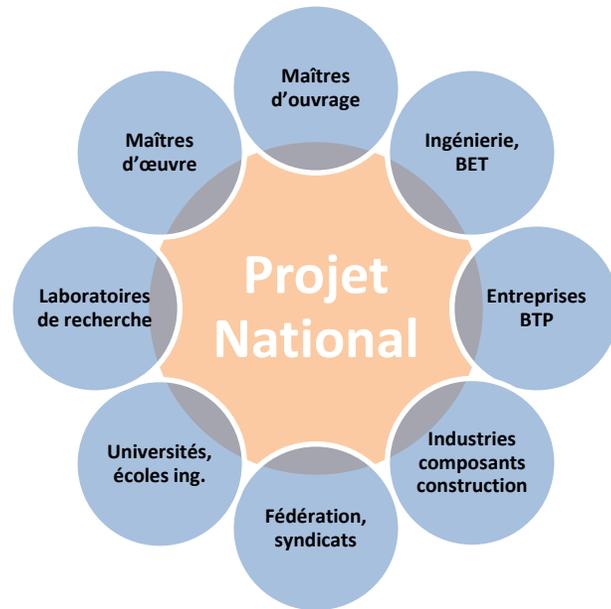
Qu'est-ce qu'un **Projet National**?

Projet collaboratif de **recherche appliquée** dans le domaine du génie civil

Engagement volontaire des différents acteurs (recherche, conception, construction, gestion):



Projets Nationaux



Partenariat :
30 à 60 partenaires

Durée :
4 ans

Budget global :
3 à 6 M€HT

Ressources :
Apports en nature (environ 70%)
Cotisations annuelles des partenaires
Subventions (CGDD, FEREC, ANR, i-Demo, Région, Europe, ...)



Financement des actions par le PN :
30% du budget total



Procédure de labellisation

Présentation devant le Comité
D'Orientation de la Recherche
Appliquée en Génie Civil
(créé par SRI du CGDD)

Excellence scientifique,
méthodologique,
positionnement
stratégique

Label « Projet National » en GC

Label du ministère MTE

CraCoDub

30 juin 2025

1. Etude d'opportunité

Contexte
Enjeux, pertinence
Esquisse état de l'art
Axes de recherche
Partenariats potentiels

2. Etude de faisabilité

Etat de l'art élargi
Verrous scientifiques et
techniques à lever
Programme de recherche et
d'expérimentation
Budget estimatif

3. Etude de montage

... plus précision du
programme de
recherche et
financement



Accompagne le montage des projets jusqu'à la labélisation et assure la **gestion administrative et financière** et la **communication des Projets Nationaux**



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

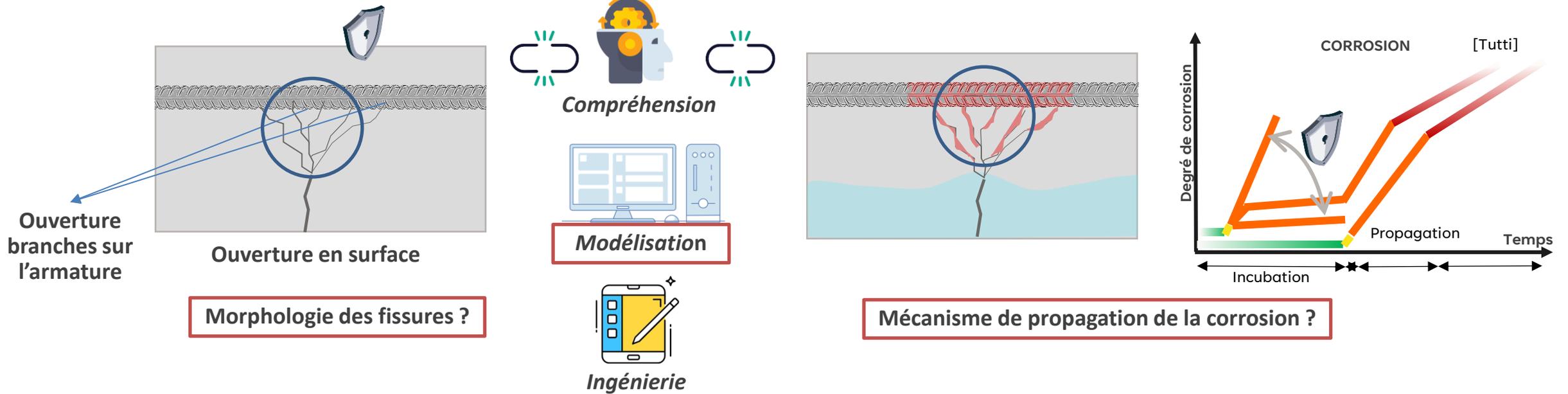
PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



Présentation des Groupes de Travail

Axe 1. Expérimentations en laboratoire *Etude des fissures et de la corrosion associée*

Fabrice Deby (Enseignant-chercheur, LMDC)



Objectifs de l'axe 1 :

- ▶ Etude des fissures et de leur géométrie au voisinage de l'armature
- ▶ Etude de la corrosion induite par les agents agressifs
- ▶ Améliorer la modélisation des phénomènes de corrosion en contexte fissuré

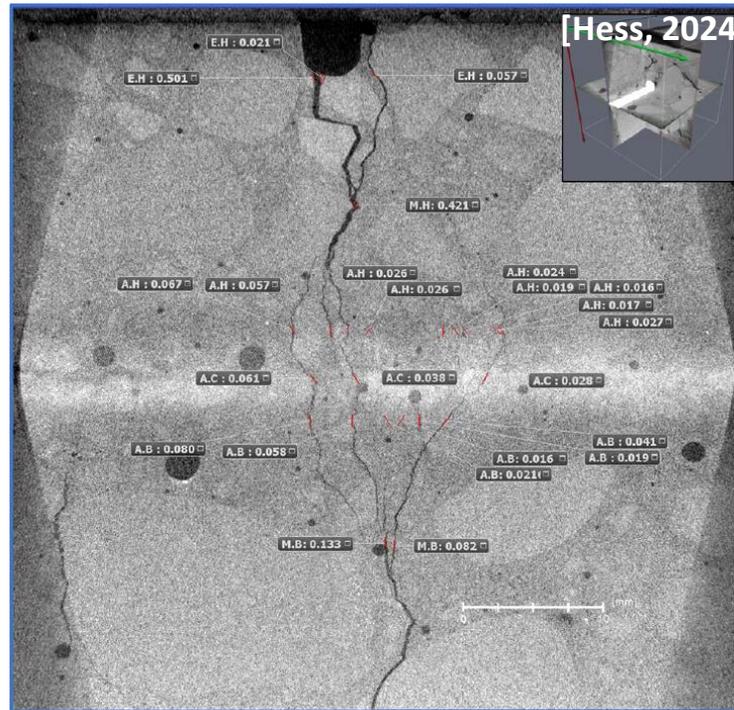
Ces objectifs correspondent à 3 sous axes de travail



Axe 1.1 – Etude des fissures et de leur géométrie au voisinage de l'armature

- ▶ Acquérir une vision réaliste du faciès 3D des fissures dans les structures afin de mieux caractériser leurs ramifications et leurs ouvertures au voisinage de l'armature
 - ⇒ Mise au point de protocoles de fissuration permettant de reproduire et maintenir des typologies de fissurations (mécanique – flexion, traction –, retrait – jeune âge, différencié –,...)
 - ⇒ Méthodologie d'acquisition du faciès 3D

Tomographie de rayons X



Essais destructifs ? : Imprégnation/Découpes/Observations



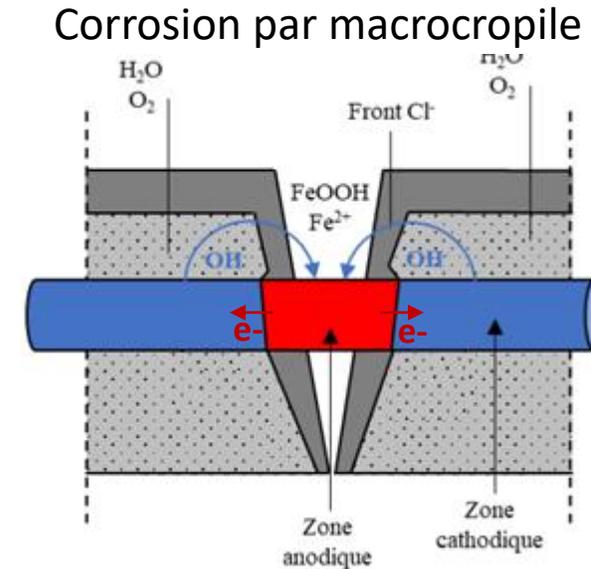
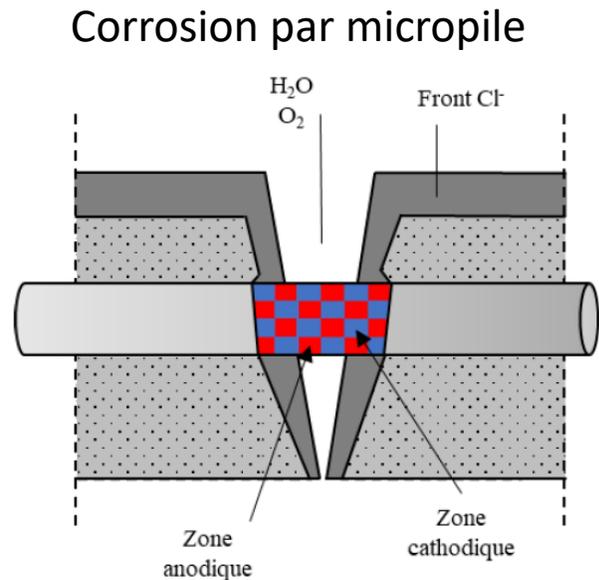
Axe 1.1 – Etude des fissures et de leur géométrie au voisinage de l'armature

- ▶ Identifier les paramètres clés qui pilotent les ramifications d'une fissure et leurs ouvertures au voisinage de l'armature (Enrobage, Φ armature, qualité du béton, nature du liant, taille et type de granulats, type d'armatures...)
 - ⇒ Plan expérimental
 - ⇒ Quel lien entre les observables macroscopiques (Contraintes, ouvertures en surface) et l'interface Acier/Béton (SCI) ?
- ▶ Proposer des critères sur des paramètres macroscopiques, facilement utilisables en ingénierie, afin de piloter la fissuration
 - ⇒ Critères (simples ?) pour ne pas dépasser une sur SCI



Axes 1.2 et 1.3 – Etude de la corrosion induite par les agents agressifs

- Développer une compréhension approfondie des mécanismes de corrosion (carbonatation, chlorures) à l'interface acier-béton en fond de fissure ; Mécanisme prédominant ?



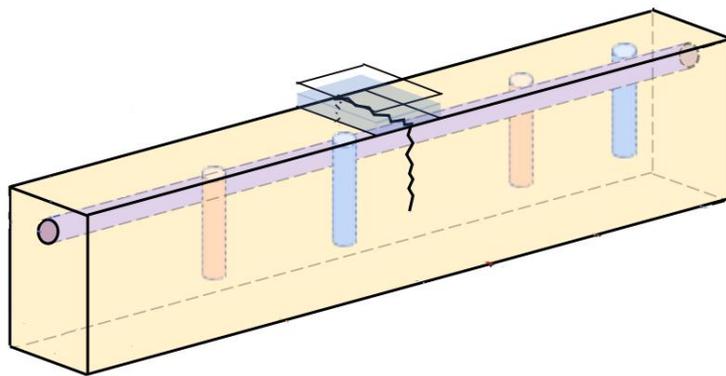
⇒ Combinaison des 2 (Chlorures vs Carbonatation)



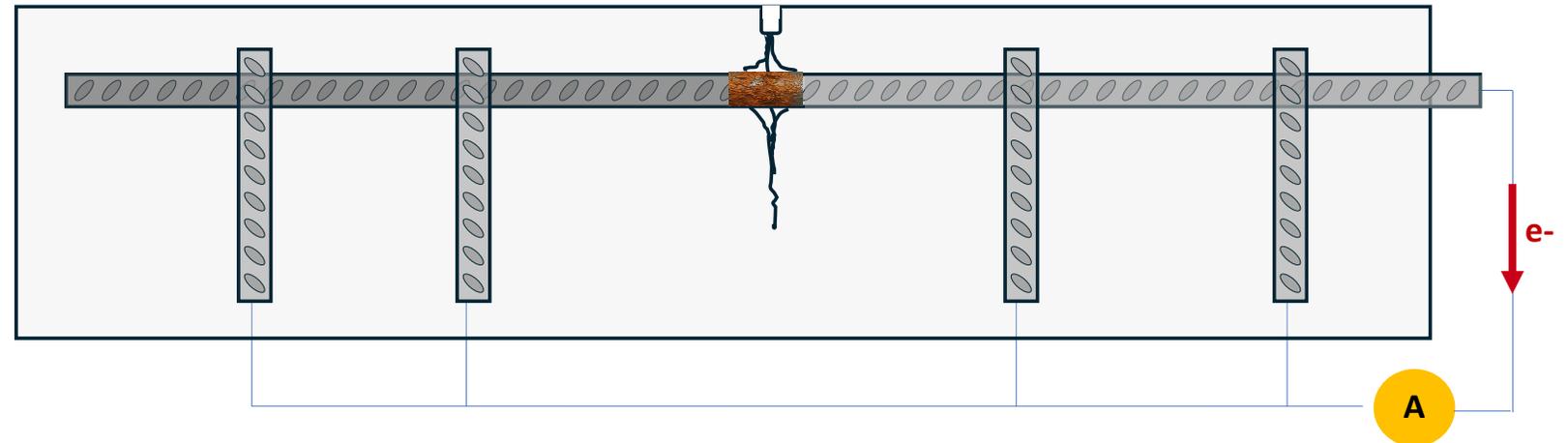
Axes 1.2 et 1.3 – Etude de la corrosion induite par les agents agressifs

- Déterminer l'influence des caractéristiques morphologiques des fissures (largeur, profondeur, ramifications, ...) sur la pénétration des agents agressifs et sur l'évolution du phénomène de corrosion.

⇒ Définition des protocoles expérimentaux (corps d'épreuve, scénarios d'agression...)



[Hess, 2024]



⇒ Monitoring de courant galvanique (part du courant de macropile)

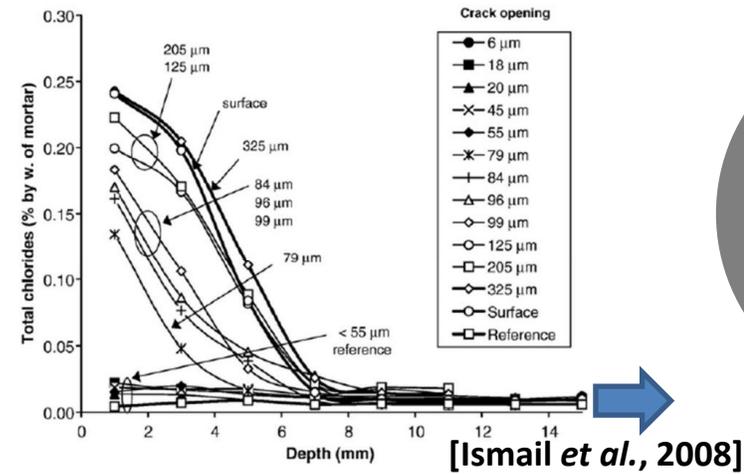
⇒ Courant macropile sur l'armature horizontale ? composante micropile ? (modèle numérique)



Axes 1.2 et 1.3 – Etude de la corrosion induite par les agents agressifs

- ▶ Déterminer l'influence des caractéristiques morphologiques des fissures (largeur, profondeur, ramifications, ...) sur la pénétration des agents agressifs et sur l'évolution du phénomène de corrosion.

⇒ Existence de seuils d'ouverture sur SCI conduisant à un(e) induction/arrêt de la corrosion ?



- ▶ Identifier et quantifier les autres facteurs pouvant retarder ou accélérer l'arrêt de la corrosion en fond de fissure.
- ▶ Étudier les mécanismes d'autocicatrisation/colmatage des fissures, notamment au voisinage des armatures, et leur impact sur la cinétique de corrosion.
- ▶ Evaluer l'influence des formulations cimentaires sur le processus de corrosion.



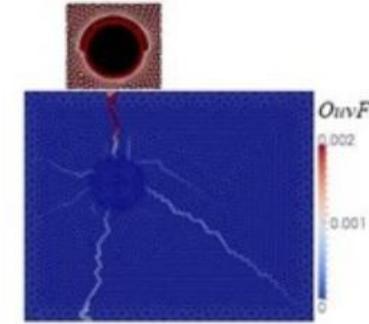
Axe 1.4 – Modélisation:

- ▶ Améliorer la modélisation des phénomènes de corrosion et les méthodes de calcul associées (règles de vérifications)

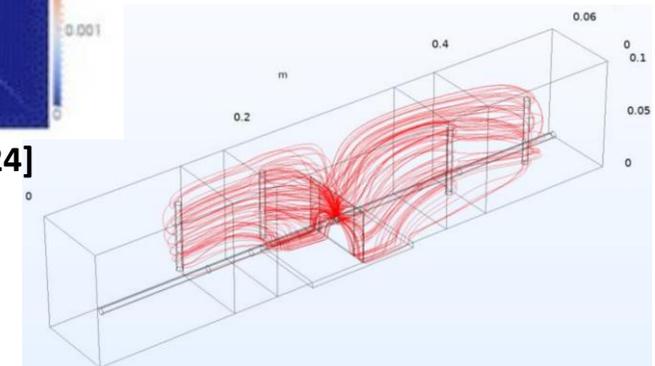
⇒ Confrontation résultats expérimentaux

⇒ Modèle de fissuration (mécanique)

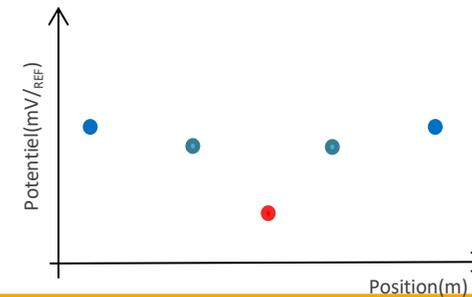
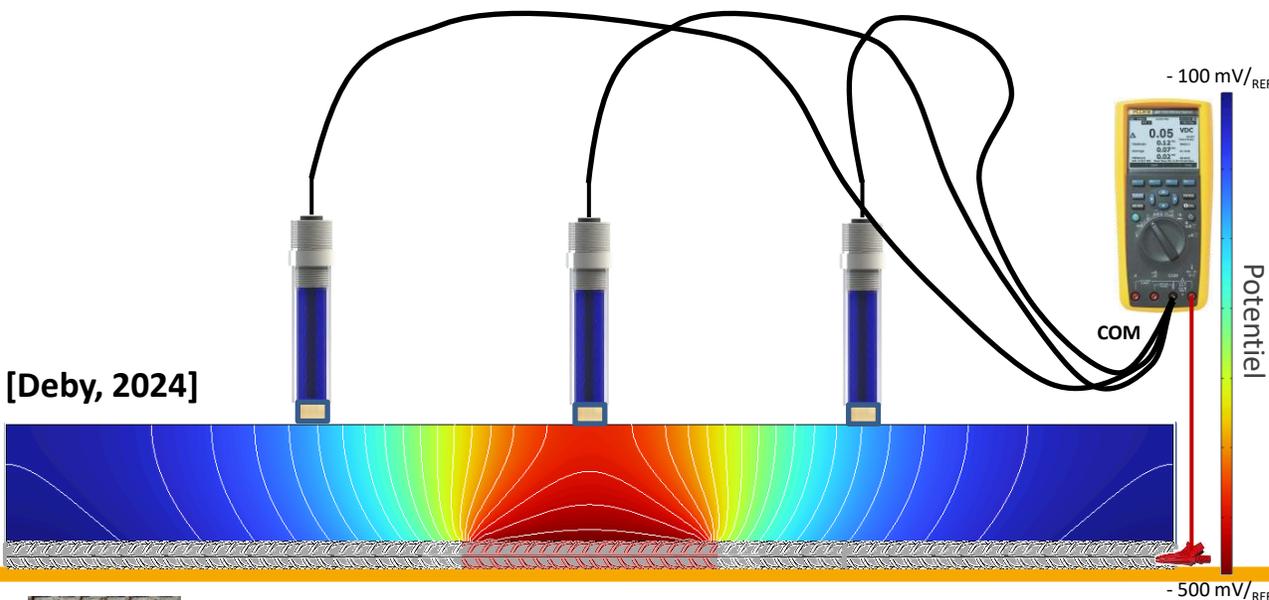
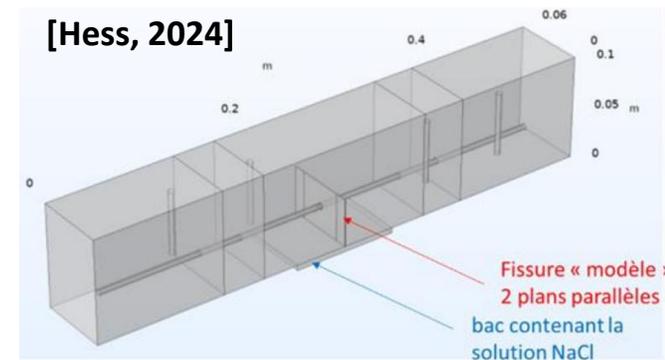
⇒ Propagation de la corrosion (électrochimie)



[Adelaide, 2024]



[Hess, 2024]



[Deby, 2024]



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



Présentation des Groupes de Travail

Axe 2. Etudes in situ sur structures réelles *Comparaison des mécanismes étudiés en laboratoire avec les structures réelles*

Alexandre Boule (Ingénieur Matériaux, EDF)

Objectifs de l'axe 2 :

S'assurer de la similarité des phénomènes étudiés en laboratoire avec les mécanismes de corrosion en fond de fissure potentiellement présents sur ouvrages réels

Méthodologie :

- ▶ Identifier des structures cibles
- ▶ Caractériser leur environnement (exposition)
- ▶ Au droit de la fissuration, évaluer par méthodes destructives ou non :
 - L'activité de corrosion et sa cinétique;
 - Les quantités d'acier dissoutes
 - La nature des produits de corrosion / de colmatage



Quels ouvrages ?

- ▶ Ouvrages en béton armé
 - ▶ Classes d'exposition liées au risque de corrosion des armatures (XC, XS, XD)
 - ▶ Présence de fissures d'ouvertures variées dont certaines importantes
 - ▶ Armatures non atteintes (hors zones fissurées) par les phénomènes de corrosion (fronts de carbonatation / chlorures n'ont pas atteint la totalité de l'enrobage)
- ⇒ Ouvrages pour lesquels la fissuration n'est pas liée à la corrosion des armatures (fissuration due aux retraits plastique, de dessiccation, thermique, empêché, fissuration structurelle...)
- ⇒ Ouvrages en « bon état » vis-à-vis de la durabilité, destinés totalement ou partiellement à la déconstruction (en raison du caractère destructif des investigations : carottage dans les armatures)



Autopsies et investigations

- ▶ Investigations non destructives (mesures électrique et électrochimiques, ...)
- ▶ Autopsies ciblées sur des zones fissurées pour caractériser la fissuration, la corrosion des armatures et les produits de corrosion formés
- ▶ Etude des mécanismes de colmatage des fissures en fonction de la formulation des bétons et des conditions d'exposition
- ▶ Prélèvements et caractérisations physico-chimiques des bétons, des interfaces acier-béton et des produits de remplissage des fissures (MEB, DRX, spectroscopie...)
- ▶ Corrélation des observations *in situ* avec les résultats obtenus en laboratoire et les modèles numériques de corrosion induite par fissuration
- ▶ ...



Critères de sélection des structures :

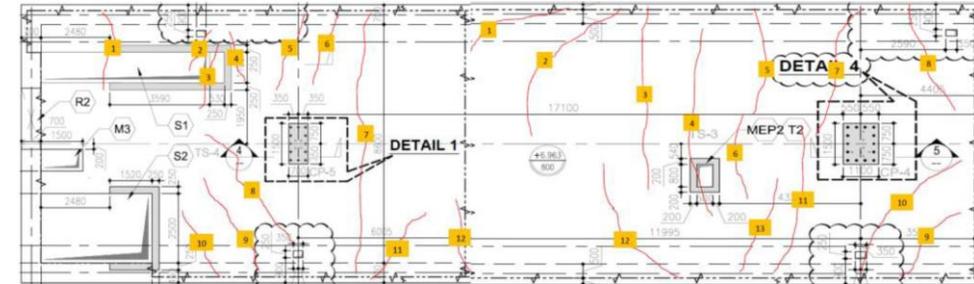
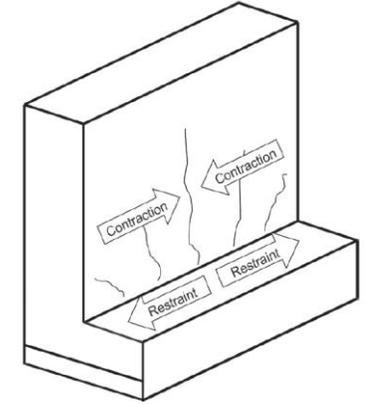
- ▶ Âge : ouvrages de plus de 20 ans (comportement représentatif du « long terme »)
- ▶ Zones non fissurées en phase d'incubation (fronts de carbonatation / chlorures n'ont pas atteint la totalité de l'enrobage)
⇒ la corrosion présente en fond de fissure est liée à la fissuration et non l'inverse
- ▶ Bétons à faibles taux de clinker à privilégier (application aux bétons « modernes »)
- ▶ Présence de documentation / dossier d'ouvrage (plans d'exécution, formulations, contrôle qualité, suivi, inspections visuelles, ...)
- ▶ Présence de comportements inattendus (fissures de grande ouverture : $> 0,5 - 0,7$ mm) sans corrosion apparente, liées à des phénomènes structurels (ex. tassements...) ou des retraits aux jeunes âges (plastique, thermique, retrait empêché)

Difficulté : structures destinées à la déconstruction ⇒ anticipation du phasage des investigations (y/c moyens d'accès, financement...) pour être réactif sur opportunité sans interférer avec le chantier



Exemple d'ouvrages cibles :

- ▶ Long voiles épais verticaux bridés par leur semelle
 - mur chasse mer
 - mur de soutènement,
 - tranchée couvertes,
 - Pont cadre hydrauliques construits en plusieurs phase, exutoires
 - Mur pare-chute de blocs
 - Séparateur central routiers (sous réserve)
- ▶ Dalles épaisse bridées par les voiles périphériques
 - Station
 - dalle de couverture
- ▶ Corps d'épreuve BHP 2000 vieillissant depuis 30 ans en zone de marnage a la Rochelle (sous réserve accord du GIS Decade)



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



Présentation des Groupes de Travail

Axe 3. Prévention et Correction

*Identification et évaluation d'actions
préventives ou correctives*

Laurent Boutillon (Directeur Scientifique, Vinci Constructions)

Objectifs de l'axe 3 :

Sur la base des résultats de l'Axe 1 et/ou d'hypothèses préliminaires prometteuses :

- ▶ **Proposer** des solutions techniques visant à réduire la propagation de corrosion liée aux fissures.

Deux types d'approches sont considérées :

- **Actions préventives** (précaution ou interventions en phase de conception ou d'exécution pour éviter l'apparition d'un facteur aggravant et/ou favoriser un facteur limitant)
 - **Actions correctives** (interventions après réalisation pour corriger un défaut d'exécution ouverture de fissure trop importante, tassement, ...)
-
- ▶ **Evaluer ces solutions** sous les aspects d'efficacité technique et de durabilité et réaliser une analyse comparative des coûts économiques et environnementaux liés à la mise en place de ces actions



Actions préventives.

Les protocoles d'essai définis et mis en œuvre à l'axe 1 pourront avantageusement permettre par exemple :

- ▶ **De définir des critères de stabilité de la formule de béton** et les conditions de coulage permettant d'éviter les risques de ressuage et de tassement et ainsi garantir une bonne interface acier béton pour prévenir tout risque de « top bar effect ».
- ▶ **D'évaluer l'intérêt** et valider une méthodologie **de rinçage des armatures** avant coulage en zone d'embruns marins ou d'exposition à des ions chlorures aériens avant coulage.
- ▶ On pourra aussi **explorer des pistes** comme l'utilisation de produits pour **accélérer l'autocicatrisation des fissures** (cristallisants, ...) ou évaluer l'intérêt de l'utilisation de revêtements de surface en alternative à l'utilisation d'armatures pour limiter les ouvertures de fissures.
- ▶ L'effet des écarteurs plastiques sur la pénétration des chlorures jusqu'aux armatures



Actions correctives.

Les protocoles d'essai définis et mis en œuvre à l'axe 1 pourront aussi permettre de **tester des actions correctives** en cas d'apparition d'ouverture de fissures excessives liées par exemple à un retrait thermique/hydrique important, à des problèmes de tassement ou des problèmes de qualité d'interface acier béton ...

- ▶ Traitements individuels des fissures (solution autres que l'injection)
- ▶ Revêtement de surface (capotage, peintures, imprégnations)
- ▶ Autres solutions

Le cadre de ce PN est **une opportunité pour tester, valider et disséminer** des solutions originales et ciblées

Les acteurs de l'Evaluation/Entretien/Réparation des Ouvrages (IMGCC, STRESS,...) sont attendu pour faire des propositions.



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



Présentation des Groupes de Travail

Axe 4. Dissémination et Internationalisation

Diffusion des connaissances afin d'assurer un impact concret et durable du projet sur les pratiques de conception et de maintenance des infrastructures en béton armé

Olivier Lherminier (Ingénieur d'études, Egis)

Objectifs de l'axe 4 :

Affiner et diffuser les résultats du projet auprès de la communauté scientifique, des acteurs du génie civil et des instances de normalisation en générant des documents de référence sur ce sujet avec une collaboration/dissémination à l'international en vue de maximiser l'efficacité sur l'évolution des codes

Méthodologie :

- ▶ Elaborer une documentation technique et scientifique complète
- ▶ Publications scientifiques et techniques pour une diffusion large des avancées
- ▶ Participation à des conférences internationales en relation directe avec le sujet
- ▶ Intégration des résultats dans l'évolution des normes et codes de conception
- ▶ Formations



Du point de vue de l'ingénierie :

A partir des résultats et des stratégies de prévisions du comportement des structures et de modélisation, proposer des spécifications applicables pour les projets

EGIS participe :

- ▶ Aux rapports qui seront diffusés
- ▶ Aux travaux du Code Model *fib* et de l'EC2 : particulièrement sur les ELS fissuration
- ▶ À rédiger des articles dans « Structural Engineering »
- ▶ À l'internationalisation lors des conférences



Prévision du comportement des structures

- ▶ Proposer des stratégies de prévision du comportement
- ▶ Modélisation et évaluation de la corrosion
- ▶ Évolution des normes :
 - Les Eurocodes, notamment en lien avec la prise en compte de la fissuration et de la durabilité;
 - Le *fib Model Code*, pour adapter les critères liés à l'ouverture des fissures et à la protection contre la corrosion
 - Le RCC-CW
- ⇒ Méthode de surveillance et d'entretien des ouvrages
- ⇒ Conditions environnementales, lié à la cinétique (évolution temporelle en fonction du taux de saturation et de la température, par exemple)



Spécifications pour les projets

- ▶ Des spécifications pour les entreprises de travaux (constructibilité et mise en place))
- ▶ Des améliorations de la modélisation des phénomènes et le calcul (règles de vérifications)
- ▶ Il existe un besoin de modèles de simulation plus sophistiqués qui intègrent les effets combinés de la fissuration, de la corrosion et des variations des propriétés du béton sur la durée de vie de la structure



Internationalisation :

- ▶ Publication d'articles scientifiques
- ▶ Sensibilisation auprès des entreprises de travaux (constructibilité et mise en place)
⇒ la corrosion présente en fond de fissure est liée à la fissuration et non l'inverse
- ▶ Participation à des conférences internationales
- ▶ Création d'un groupe de réflexion scientifique international sur le sujet



Souhaiteriez vous participer à ce projet ?

Merci de renseigner sur quel(s) axe(s) dans le formulaire suivant :



https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSeZIkynP_3Kd36_1IR-JQHceH8IYI3y0eXmtB5dMuH2P4A51g/viewform?usp=header

Des groupes de travail seront constitués par la suite



PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability

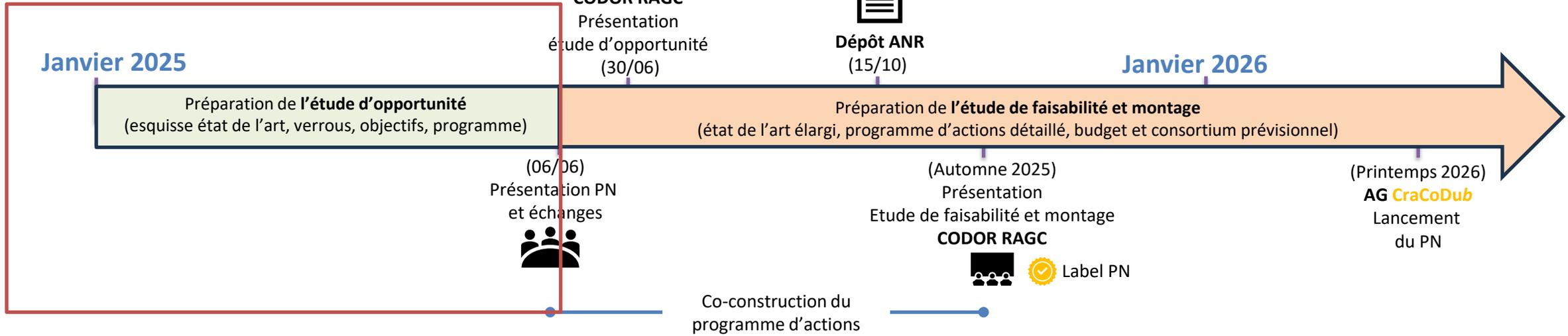


L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

Organisation du projet

Mouna Boumaaza

Ingénieur béton, Vinci Construction Grands Projets



Genèse du projet : Étude d’opportunité et cadrage initial

Janvier 2025

Mai 2025

Thèse Rita Ghantous (2016)

Thèse Lucas Hess (2024)

Préparation de l’étude d’opportunité (esquisse état de l’art, verrous, objectifs, programme)



Envoi de la note étude d’opportunité Au RAGC

Core Team		
Structure	Prenom	NOM
VCSP	François	CUSSIGH
VCGP	Mouna	BOUMAAZA
VCGP	Laurent	Boutillon
EDF	Alexandre	BOULE
UGE	Véronique	BOUTEILLER
CERIB	Jonathan	MAI-NHU
LMDC	Fabrice	DEBY
LMDC	Thierry	VIDAL
IREX	Camilo	DURAN
IREX/FNTP	Philippe	GOTTELAND
FNTP	Massinissa	BENABDELLOUAHED
INFRA 2050	Jason	QUEUDRAY
EGIS	Philippe	BISCH
SIXENSE	Christophe	MICHAUX
Eiffage	Laure	Abdul
Eiffage	Sandrine	Chanut
Egis	Olivier	Lherminier
Université Gustave Eiffel	Lucas	Adelaide



Genèse du projet : Étude d'opportunité et cadrage initial

Janvier 2025

Juin 2025

Thèse Rita Ghantous (2016)

Thèse Lucas Hess (2024)

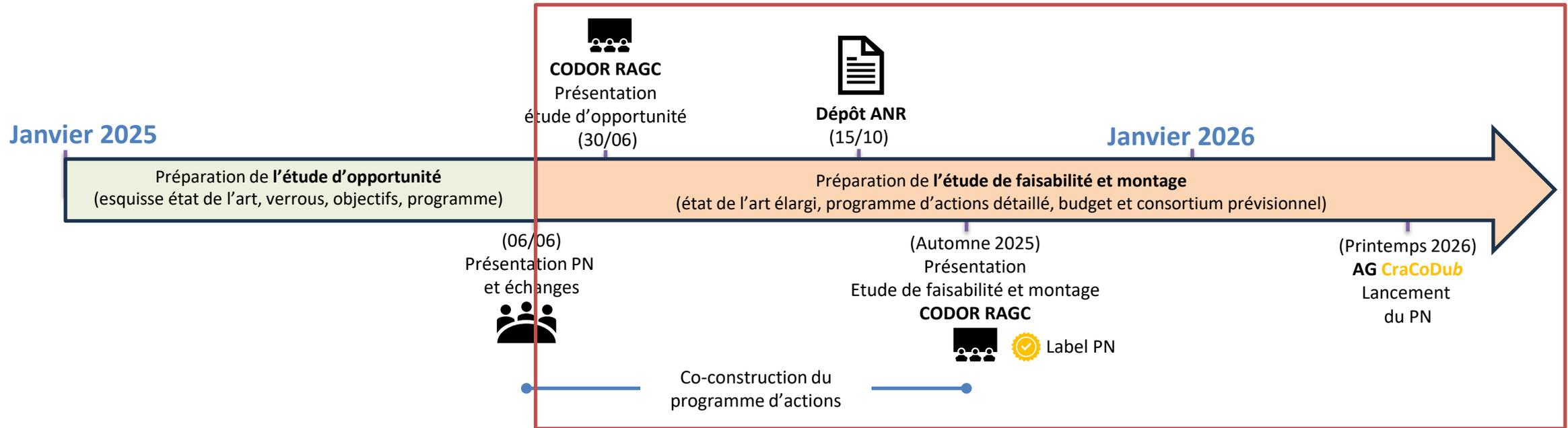
Préparation de **l'étude d'opportunité**
(esquisse état de l'art, verrous, objectifs, programme)



Matinée d'échanges

Core Team		
Structure	Prenom	NOM
VCSP	François	CUSSIGH
VCGP	Mouna	BOUMAAZA
VCGP	Laurent	Boutillon
EDF	Alexandre	BOULE
UGE	Véronique	BOUTEILLER
CERIB	Jonathan	MAI-NHU
LMDC	Fabrice	DEBY
LMDC	Thierry	VIDAL
IREX	Camilo	DURAN
IREX/FNTP	Philippe	GOTTELAND
FNTP	Massinissa	BENABDELLOUAHED
INFRA 2050	Jason	QUEUDRAY
EGIS	Philippe	BISCH
SIXENSE	Christophe	MICHAUX
Eiffage	Laure	Abdul
Eiffage	Sandrine	Chanut
Egis	Olivier	Lherminier
Université Gustave Eiffel	Lucas	Adelaide





Projet ANR & PN CraCoDub en Parallèle



ANR: retroplanning



Projet ANR : Pourquoi ?

Accéder à un
financement
structurant

Permet de soutenir des actions de recherche ambitieuses, souvent difficiles à financer uniquement par les partenaires.

Accélérer les
travaux
expérimentaux

Offre les moyens de conduire des campagnes d'essais et de modélisation plus poussées (matériel, personnel, temps).

Alimenter et
renforcer le PN
CraCoDub

L'ANR peut démarrer avant ou en parallèle du PN pour porter les actions expérimentales (axe 1) en amont.



Projet ANR : Quoi ?

Axe 1.1

Etude des fissures et de leur géométrie au voisinage de l'armature

Axes 1.2 & 1.3

Etude de la corrosion induite par les agents agressifs (CO_2 , Chlorures)

Axe 1.4

Modélisation



Projet ANR : Quoi ?

Axe 1.1

Etude des fissures et de leur géométrie au voisinage de l'armature

Axes 1.2 & 1.3

Etude de la corrosion induite par les agents agressifs (CO₂ , Chlorures)

Axe 1.4

Modélisation

Les résultats issus de l'ANR alimenteront et orienteront **les choix techniques, méthodologiques et stratégiques** des autres axes du projet CraCoDub.

Démarrer ANR et PN en parallèle afin de **ne pas freiner** l'avancement des autres axes du PN CraCoDub



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026

juin-25 juil-25 août-25 sept-25 oct-25 nov-25 déc-25 janv-26 févr-26 mars-26 avr-26 mai-26 juin-26 juil-26 août-26 sept-26



Démarrage officiel
souhaité du projet ANR

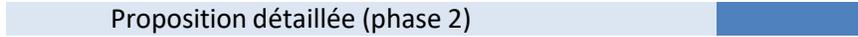


Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026

juin-25 juil-25 août-25 sept-25 oct-25 nov-25 déc-25 janv-26 févr-26 mars-26 avr-26 mai-26 juin-26 juil-26 août-26 sept-26



Département officiel
souhaité du projet ANR



Proposition détaillée (phase 2)

Dépôt de la
Proposition détaillée
(phase 2)



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026

juin-25 juil-25 août-25 sept-25 oct-25 nov-25 déc-25 janv-26 févr-26 mars-26 avr-26 mai-26 juin-26 juil-26 août-26 sept-26

Proposition détaillée (phase 2)

Dépôt de la
Proposition détaillée
(phase 2)

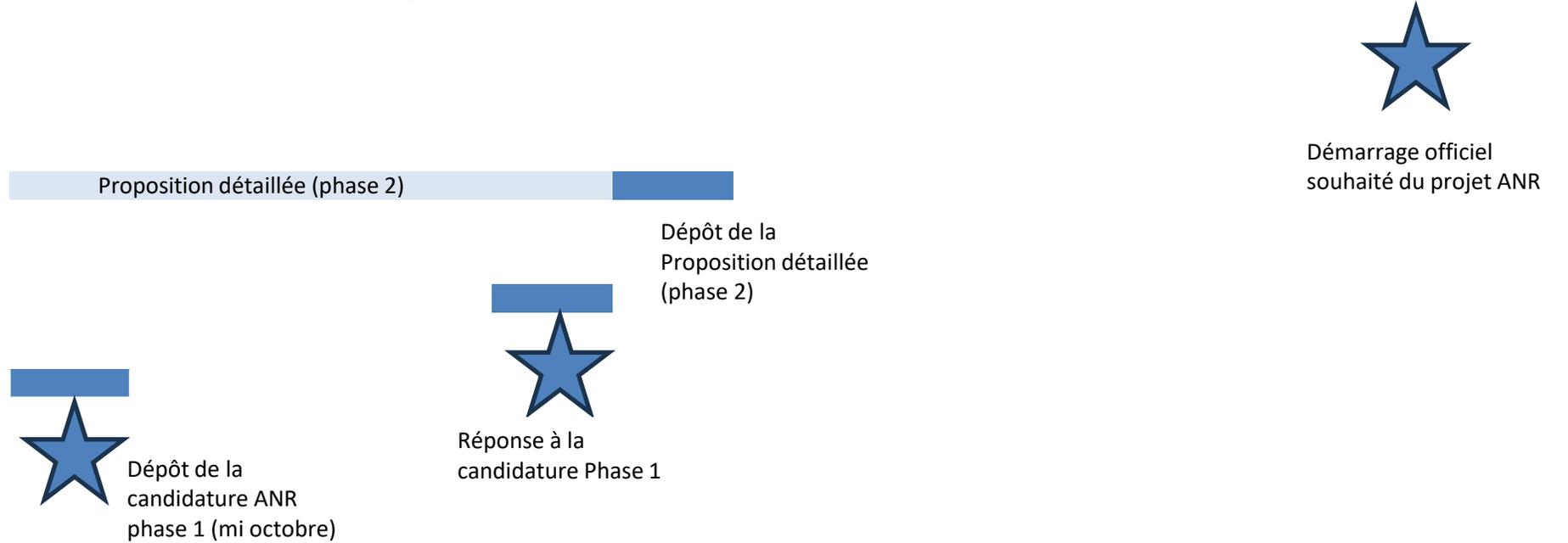
Réponse à la
candidature Phase 1

Démarrage officiel
souhaité du projet ANR



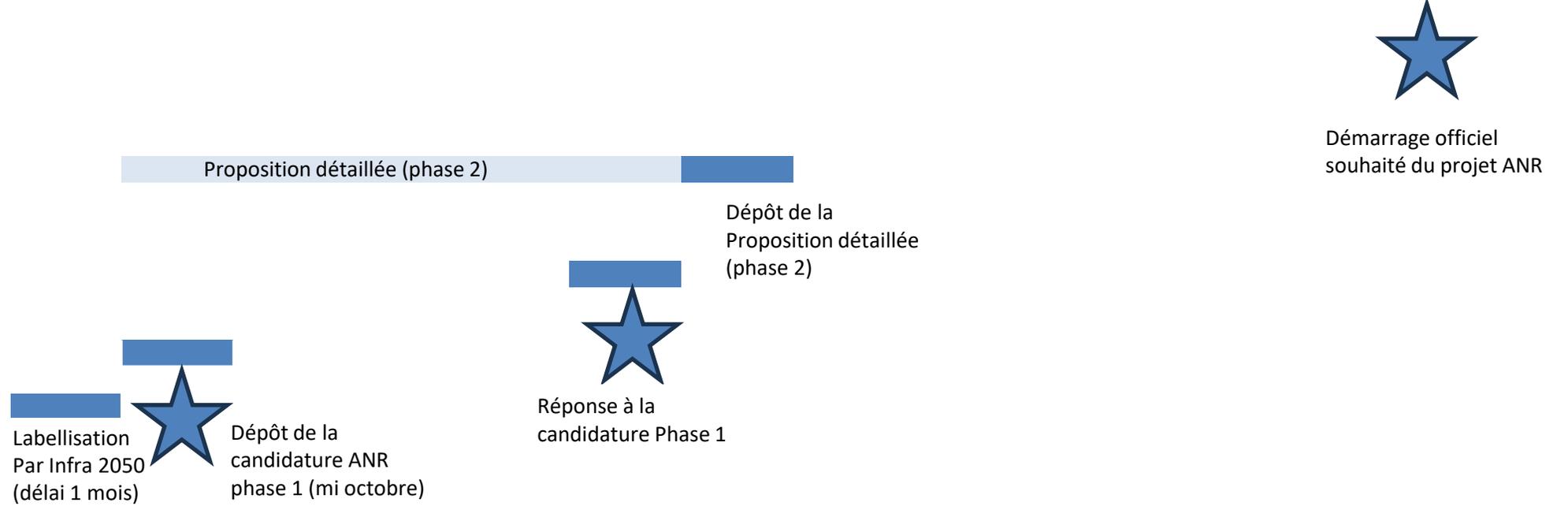
Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026

juin-25 juil-25 août-25 sept-25 oct-25 nov-25 déc-25 janv-26 févr-26 mars-26 avr-26 mai-26 juin-26 juil-26 août-26 sept-26



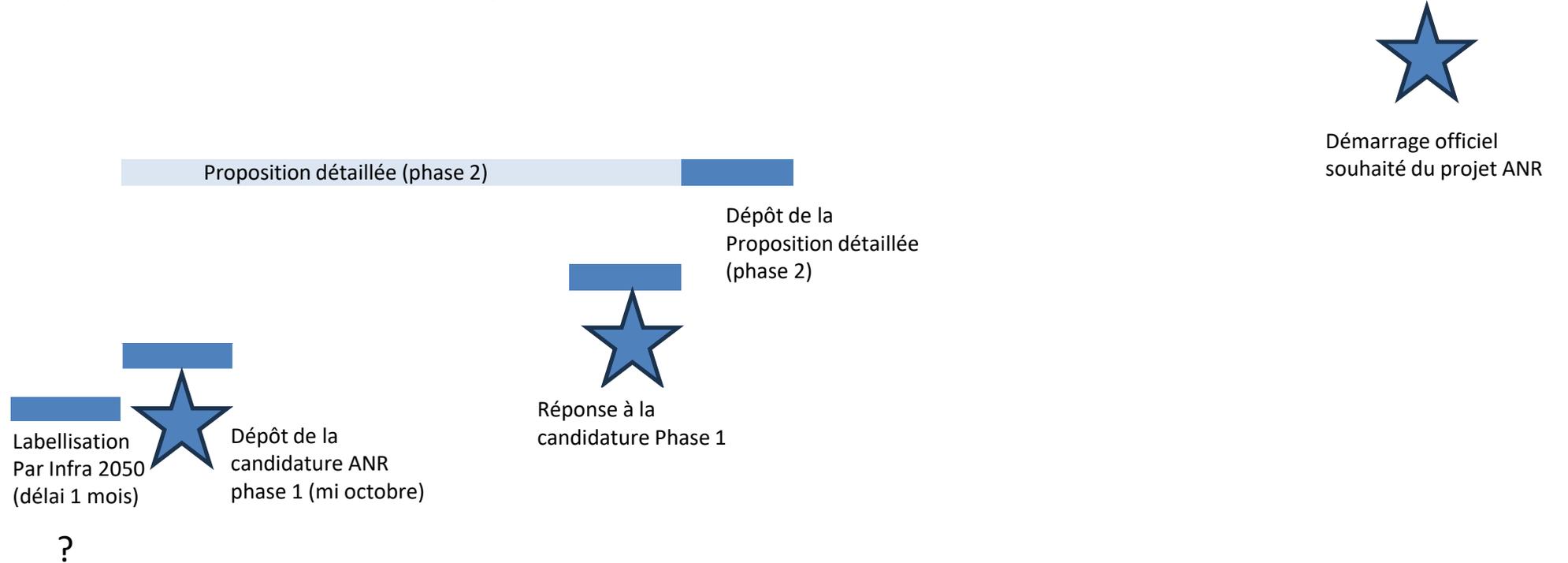
Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026

juin-25 juil-25 août-25 sept-25 oct-25 nov-25 déc-25 janv-26 févr-26 mars-26 avr-26 mai-26 juin-26 juil-26 août-26 sept-26



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026

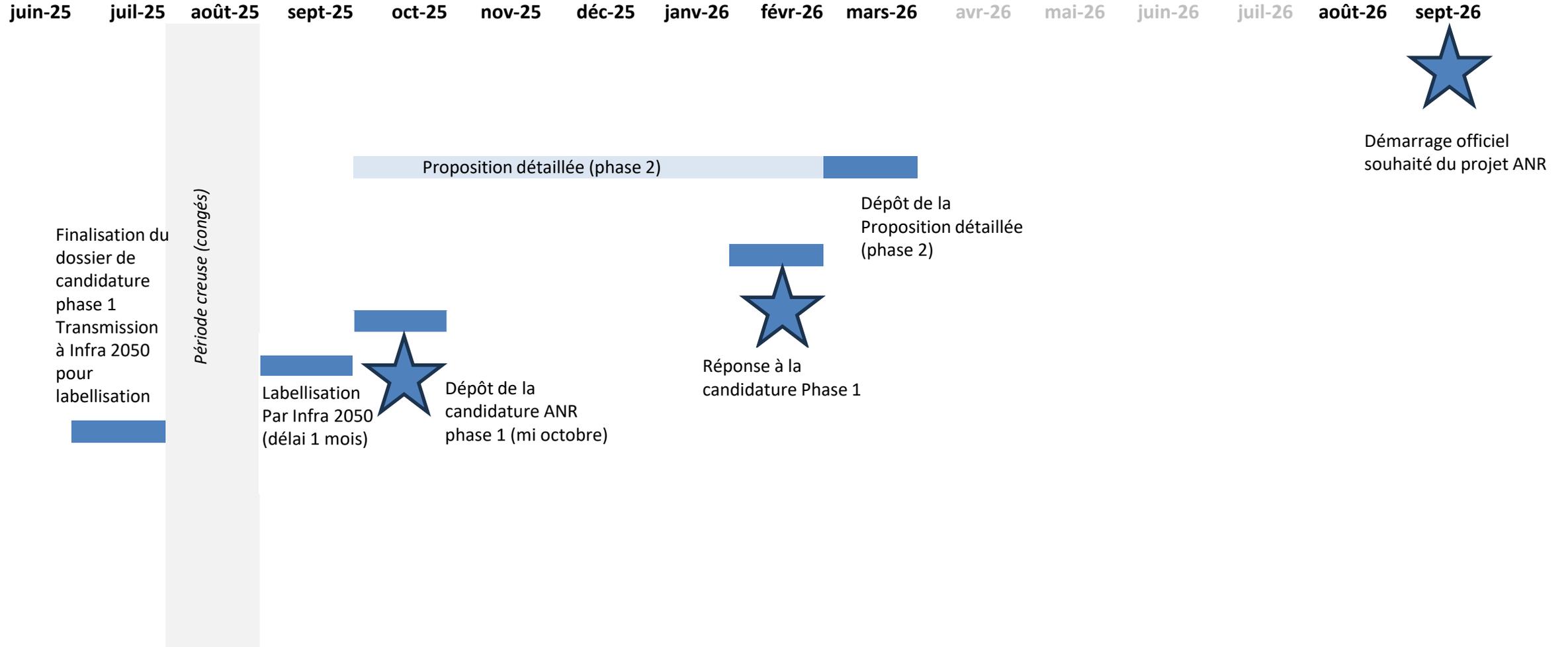
juin-25 juil-25 août-25 sept-25 oct-25 nov-25 déc-25 janv-26 févr-26 mars-26 avr-26 mai-26 juin-26 juil-26 août-26 sept-26



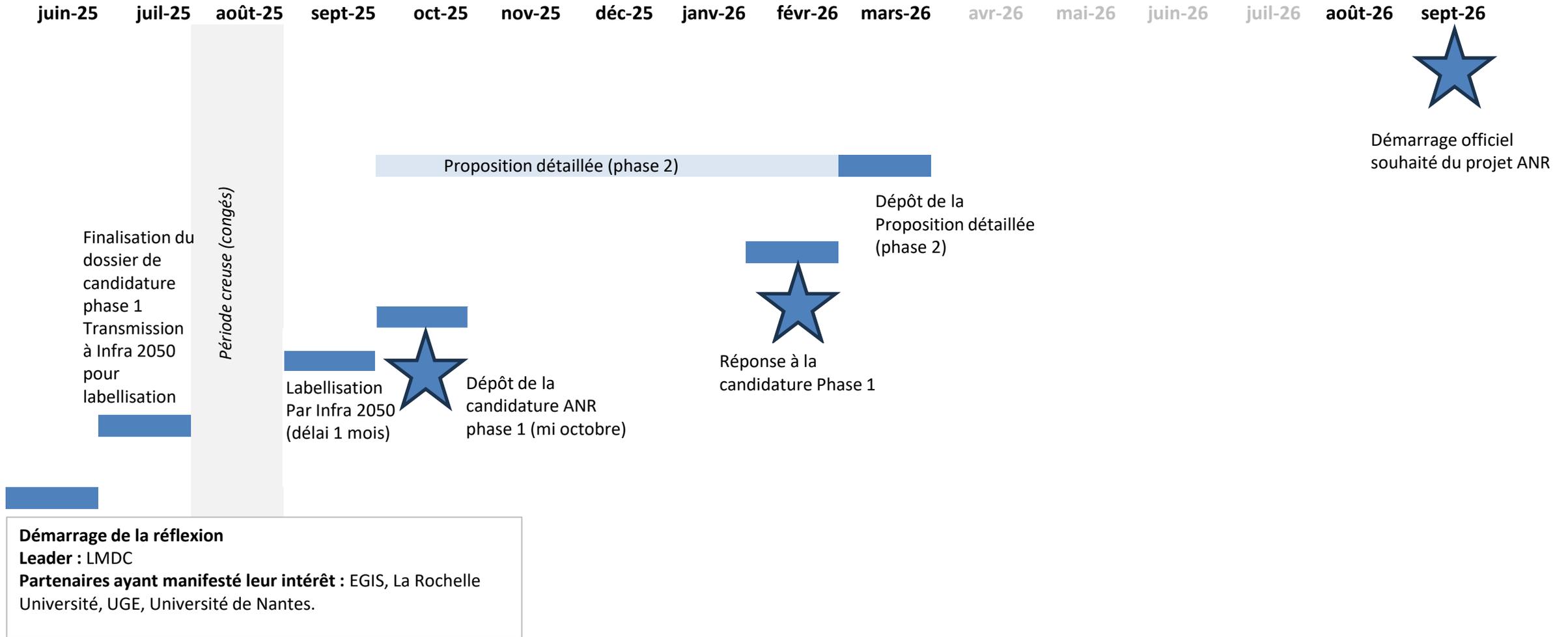
- **Crédibilité renforcée** : elle apporte une reconnaissance institutionnelle qui valide la qualité scientifique et stratégique du projet auprès des financeurs comme l'ANR.
- **Augmentation des chances de financement** : un projet labellisé Infra 2050 est mieux positionné dans les processus de sélection ANR (Taux de sélection 24%) .



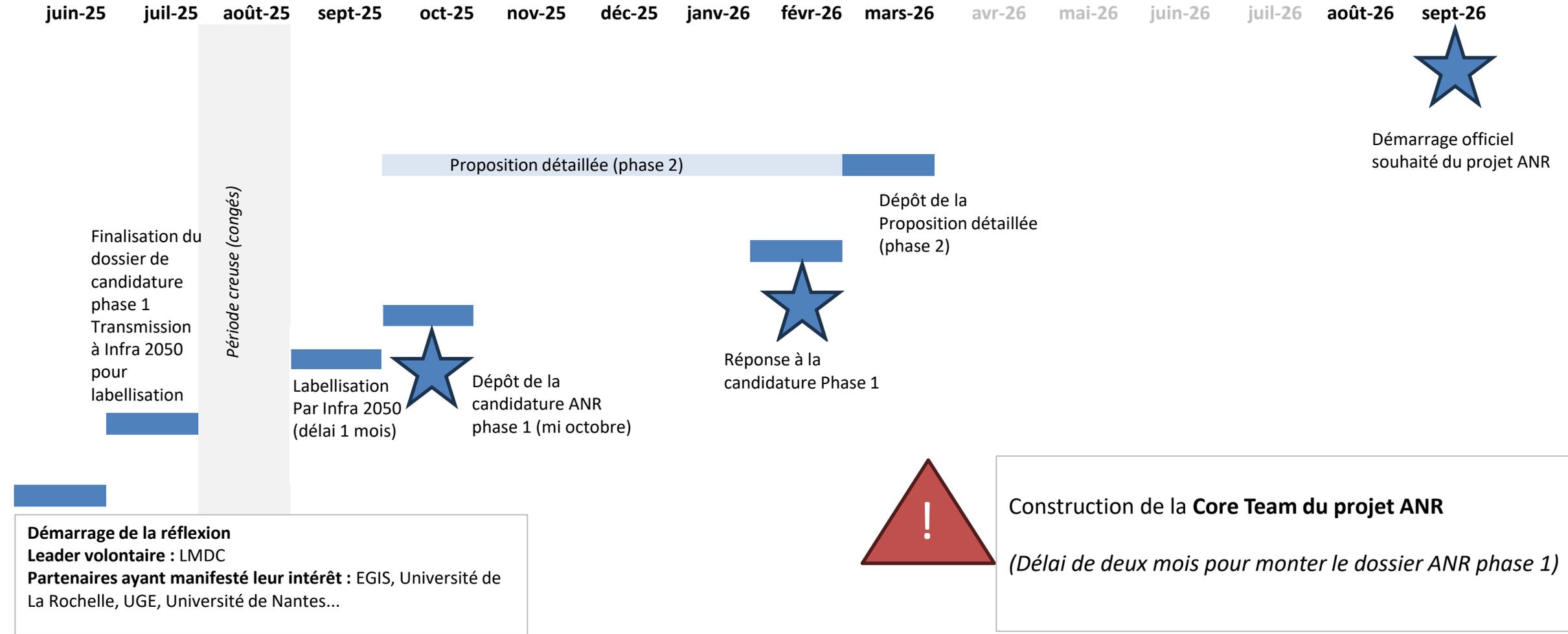
Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026



PN CraCoDub: retroplanning



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026

juin-25

juil-25

août-25

sept-25

oct-25

nov-25

déc-25

janv-26

févr-26

mars-26

avr-26

mai-26



Démarrage officiel souhaité du projet
national CraCoDub



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026

juin-25

juil-25

août-25

sept-25

oct-25

nov-25

déc-25

janv-26

févr-26

mars-26

avr-26

mai-26



Note étude de faisabilité et de montage



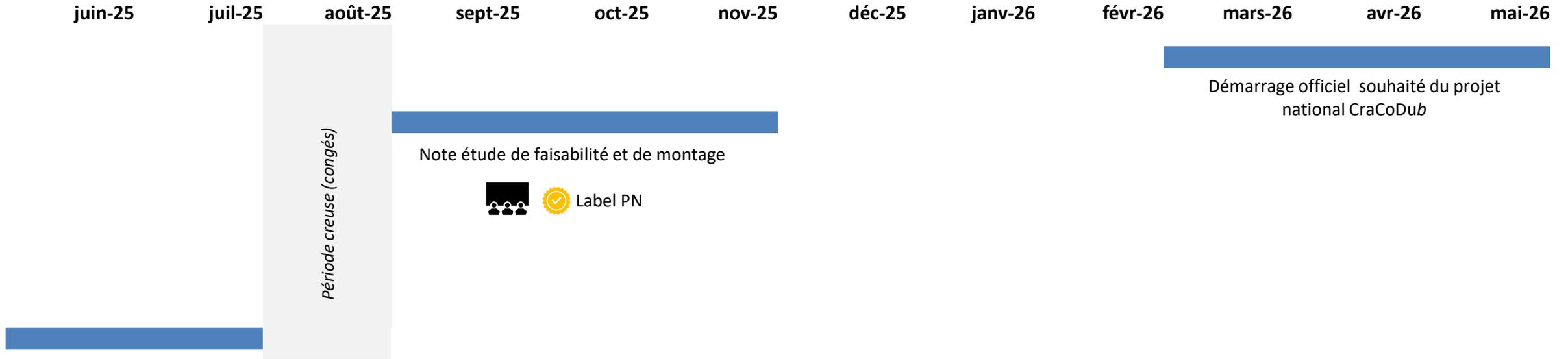
Label PN



Démarrage officiel souhaité du projet national CraCoDub



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026



Etude de faisabilité:

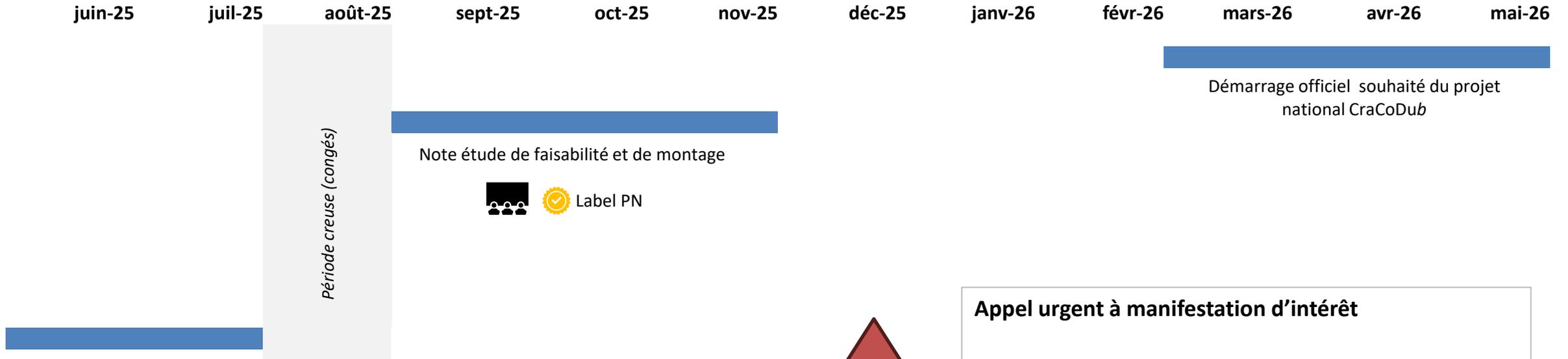
- Etat de l’art
 - Verrous techniques à lever
 - Proposition de programme de recherche et d’expérimentation détaillé

Etude de montage:

- Finaliser le programme de recherche complet
- le financement du projet.



Projet ANR : rétroplanning de la candidature 2025–2026



Etude de faisabilité:

- Etat de l’art
 - Verrous techniques à lever
 - Proposition de programme de recherche et d’expérimentation détaillé

Etude de montage:

- finaliser le programme de recherche complet
- le financement du projet.



Appel urgent à manifestation d’intérêt

(Merci de vous faire connaître rapidement si vous souhaitez contribuer)



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



Discussion - Table ronde

Fabrice Deby (Enseignant-chercheur, LMDC)

Alexandre Boule (Ingénieur matériaux, EDF)

Olivier Lherminier (Ingénieur d'études, Egis)

Lucas Adelaïde (Chercheur, UGE)

François Cussigh (Expert béton, Vinci)

PROJET DE RECHERCHE
CraCoDub
Crack, Corrosion & Durability



L'optimisation
de la conception
des procédés
et des performances

Merci pour votre attention