IMGC

DIAGNOSTIC ET RÉPARATION DU BÉTON ARMÉ DÉGRADÉ PAR CORROSION

Journée Technique

MARDI 31 MAI 2022

FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS

En collaboration avec le CEFRACOR

L'évaluation de la portance des OA dégradés par la corrosion

Frédéric DUPRAT, LMDC
Louis MARRACCI, ARCADIS

Initiation et propagation de la corrosion

Initiation de la corrosion des armatures par :

- Baisse du pH de la solution interstitielle du fait de la carbonatation du béton d'enrobage,
- Rupture de la couche de passivation par l'action des chlorures.

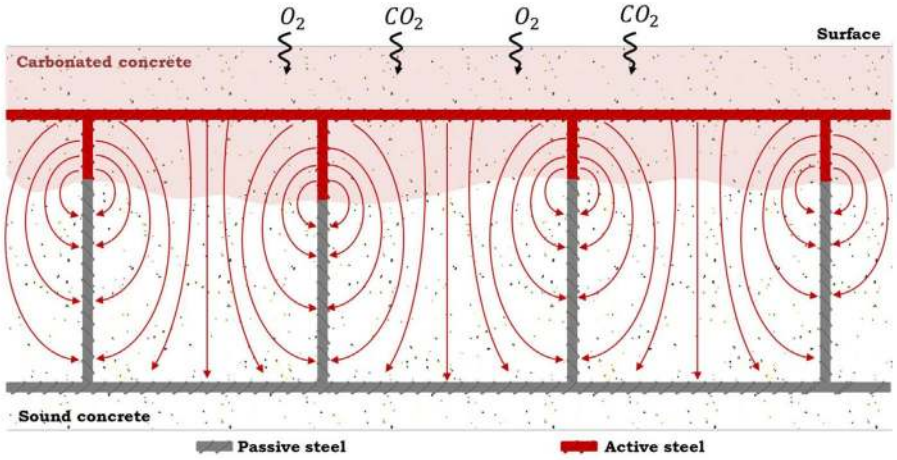
Facilitation de l'initiation de la corrosion par :

- Des propriétés de transfert élevées (porosité, perméabilité, etc.),
- La fissuration du béton d'enrobage (accès direct aux armatures),
- La faible qualité ou l'endommagement de l'interface acier-béton (vide, microfissuration, etc.)

Initiation et propagation de la corrosion

Propagation de la corrosion des armatures :

- Corrosion initiée par carbonatation : apparence généralisée ou uniforme.



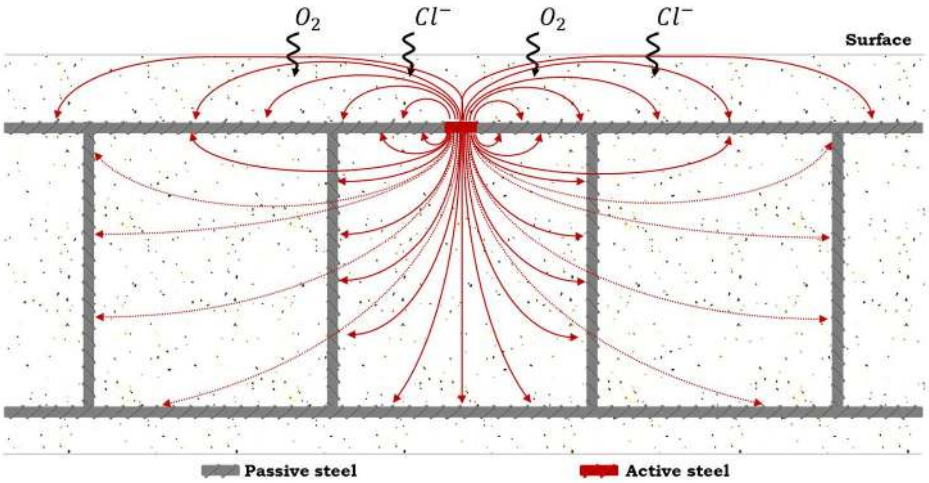
Crédit S. Laurens



Initiation et propagation de la corrosion

Propagation de la corrosion des armatures :

- Corrosion initiée par contamination aux chlorures : piqûres localisées

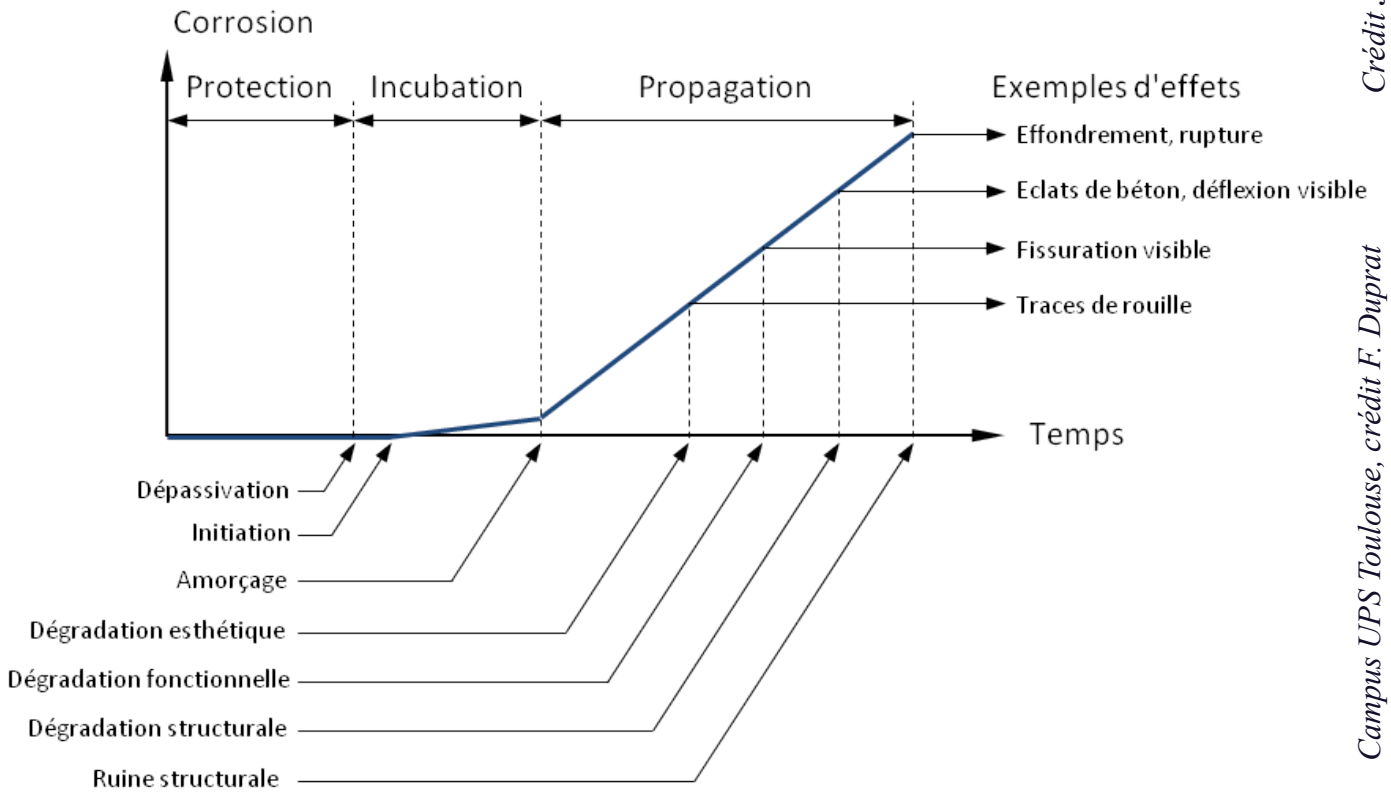


Crédit S. Laurens



Initiation et propagation de la corrosion

Etapes de la dégradation des ouvrages



Wolverhampton car park



Crédit J. Wood



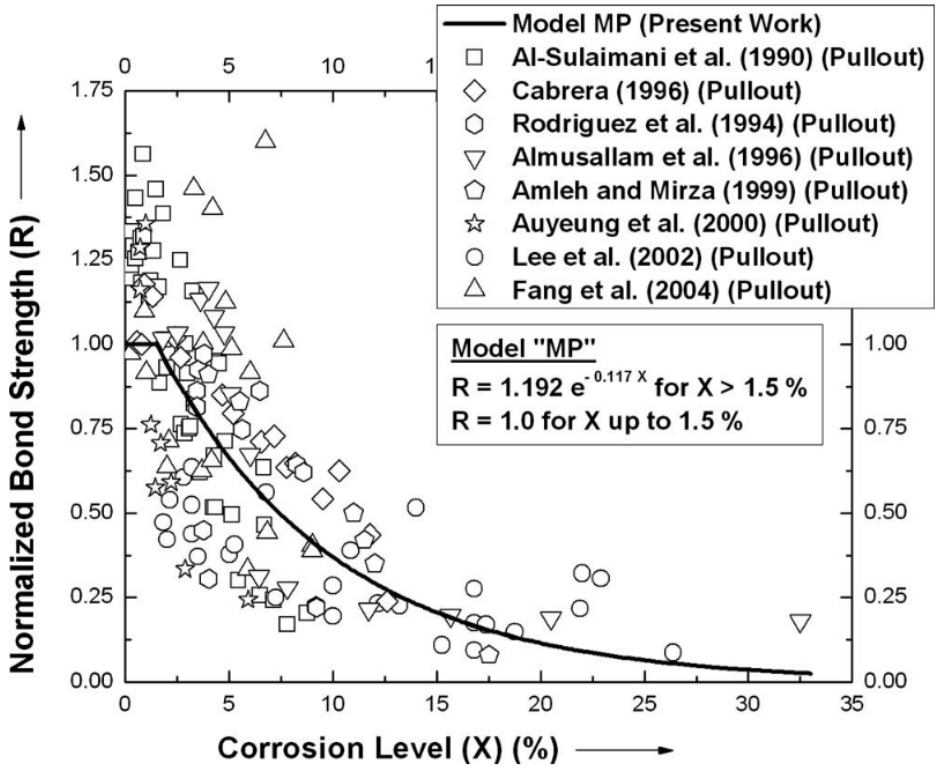


Campus UPS Toulouse, crédit F. Duprat

Altération du comportement des armatures

Perte d'adhérence par arrondissement des crénelures et formation d'une couche d'oxydes friables

Bhargava et al., Jour. Struc. Eng., 2008

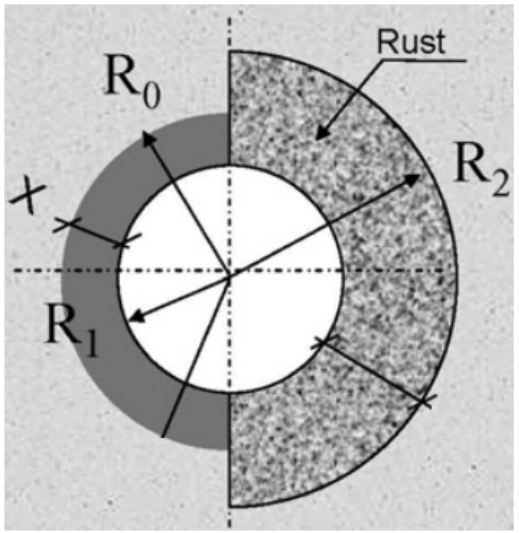


Altération du comportement des armatures

Perte d'adhérence par fissuration du béton d'enrobage

- Le volume molaire des produits formés est supérieur à celui du fer.

		V_{rust}/V_{Fe}	V_{rust}/V_{Fe}	Density (kg/m^3)	Molecular weight kg/mol
Iron	Fe	/	/		
Hematite	1/2 Fe_2O_3	2.12	2.2		
Magnetite	1/3 Fe_3O_4	2.08	2		
Goethite	α-FeOOH	2.91			
Akageneite	β-FeOOH	3.48			
Lepidocrocite	γ-FeOOH	3.03			
Ferrous oxyde	$Fe(OH)_2$		3.75		
Ferric oxyde	$Fe(OH)_3$		4.2		
	$Fe(OH)_3$, $3H_2O$		6.40		

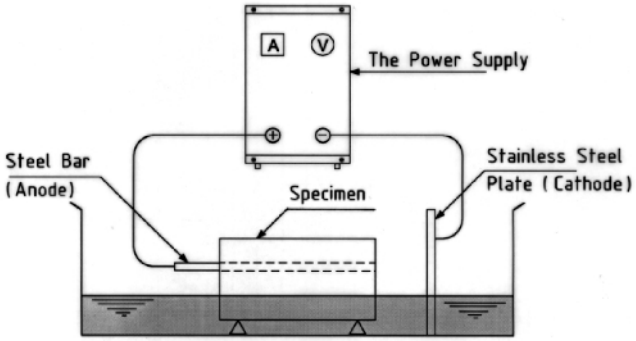


Caré et al., Cem. Conc. Res., 2008

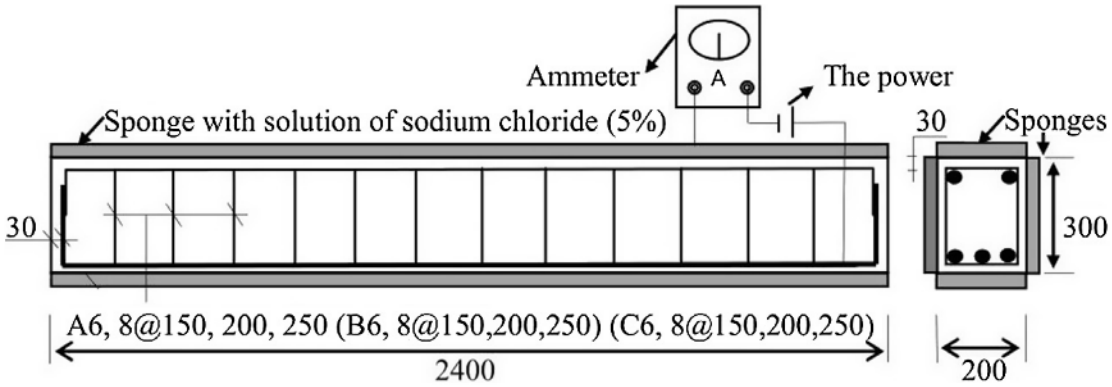
Altération du comportement des armatures

Modification des propriétés mécaniques

- Résultats expérimentaux sur armatures corrodées par courant imposé après initiation par contamination aux chlorures



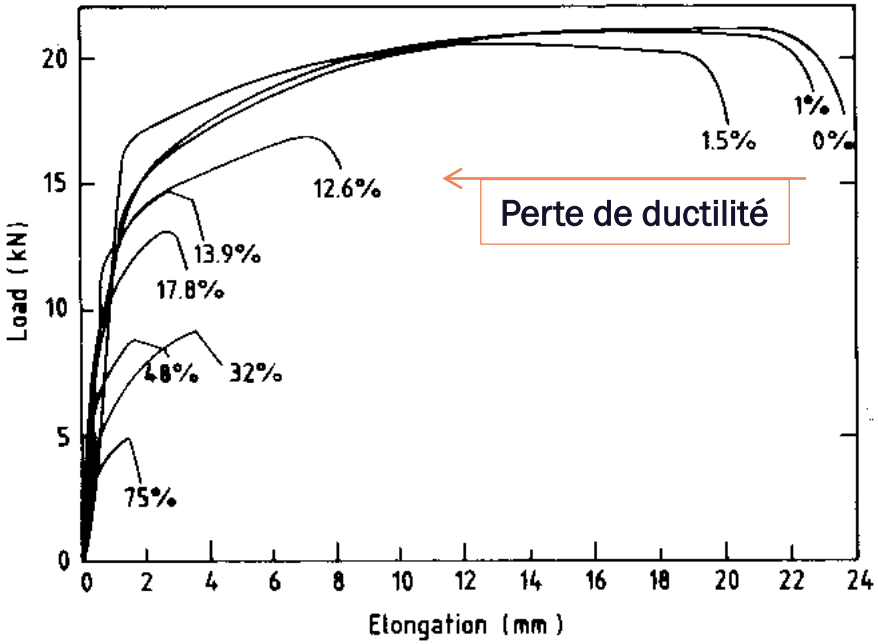
Almusallam et al., Const. Build.. Mat., 2001



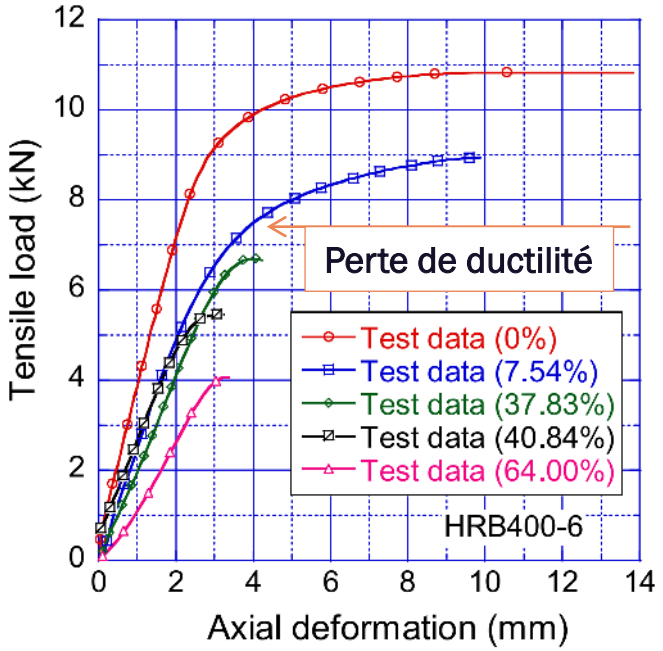
Lu et al., Const. Build.. Mat., 2016

Altération du comportement des armatures

Modification des propriétés mécaniques : relation de comportement force-allongement



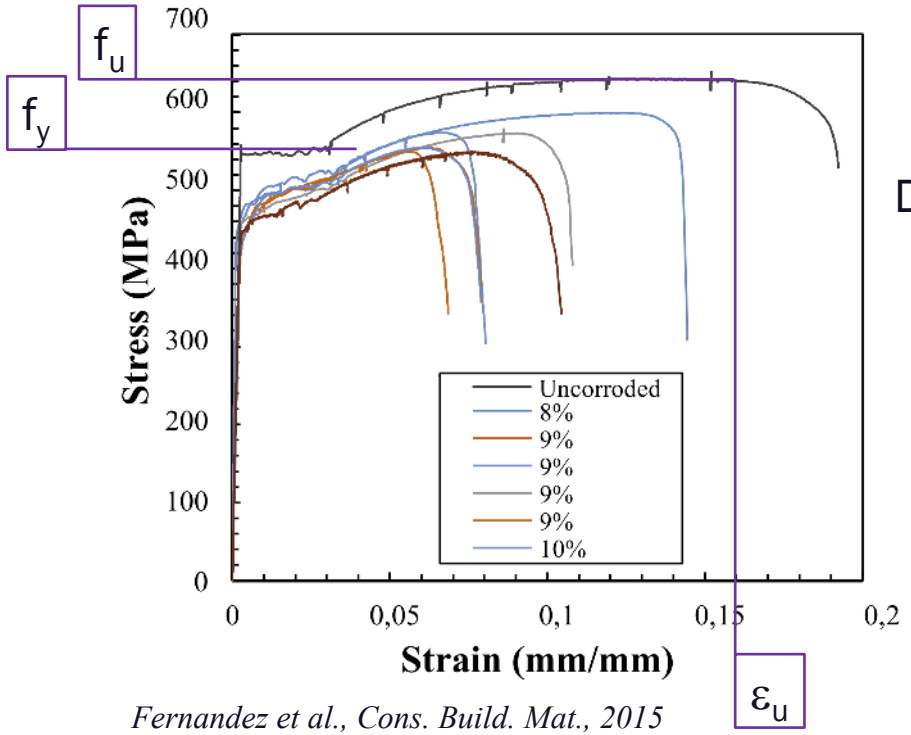
Almusallam et al., Cons. Build. Mat., 2001
(acier Ø6 mm, f_y=600 MPa)



Lu et al., Cons. Build. Mat., 2016
(acier Ø6 mm, f_y=450 MPa)

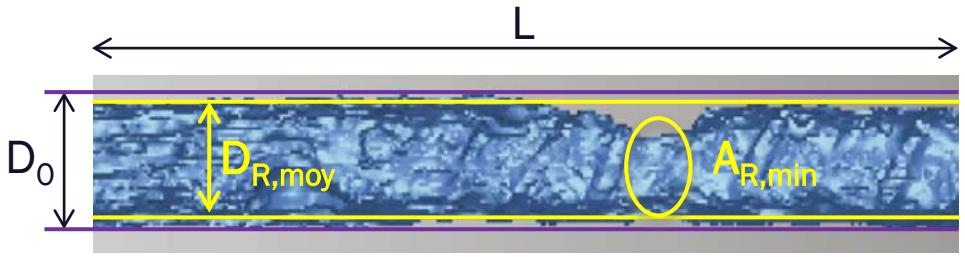
Altération du comportement des armatures

Modification des propriétés mécaniques : relation de comportement contrainte-déformation



Fernandez et al., Cons. Build. Mat., 2015
(acier Ø10 mm, f_y=500 MPa)

Estimation du taux de corrosion CR



$$D_{R,moy} = \sqrt{D_0^2 - \frac{4\,\Delta m}{\pi\,\rho_s\,L}} \Rightarrow CR_{moy} = \frac{D_0^2 - D_{R,moy}^2}{D_0^2}$$

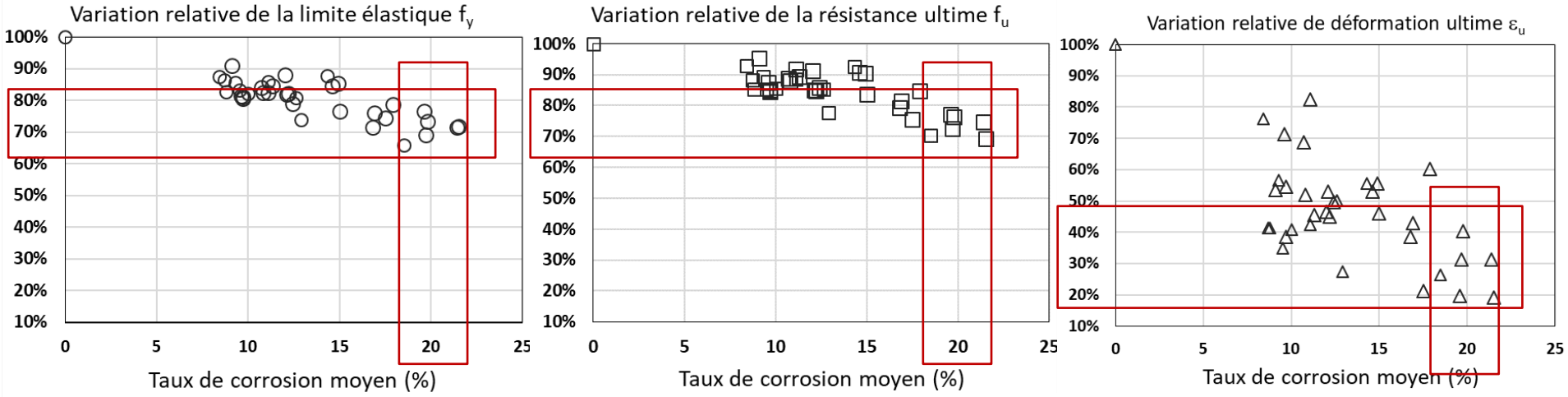
$$A_{R,min} = \min_L A_R(p) \Rightarrow CR_{max} = \frac{A_0 - A_{R,min}}{A_0}$$

Estimation de la section réduite et des contraintes f_y et f_u $\begin{cases} A_{R,min} \\ A_{R,moy} \end{cases}$?

Altération du comportement des armatures

Modification des propriétés mécaniques : relation de comportement contrainte-déformation

Limite élastique f_y | Résistance ultime f_u | Déformation ultime ε_u



Fernandez et al., Cons. Build. Mat., 2020 (acier Ø10-12 mm, f_y=500 MPa, ***L=315 mm****)*

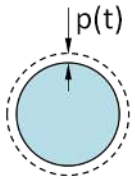
Altération du comportement des armatures

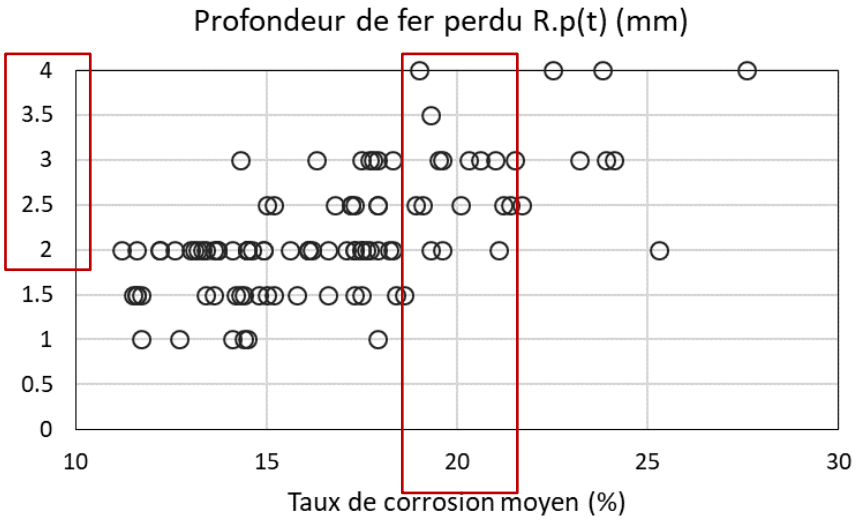
Perte de section résistante

p(t) : épaisseur uniforme de fer perdu $p(t) = \frac{M_{Fe}}{z_s \, \rho_s \, F} \int_0^t j_{corr}(\tau) \, d\tau$

R : facteur de piqûre

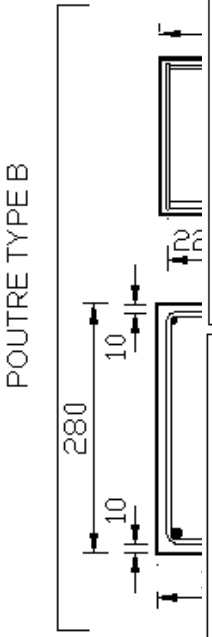
⇨ R.p(t) : profondeur de fer perdu

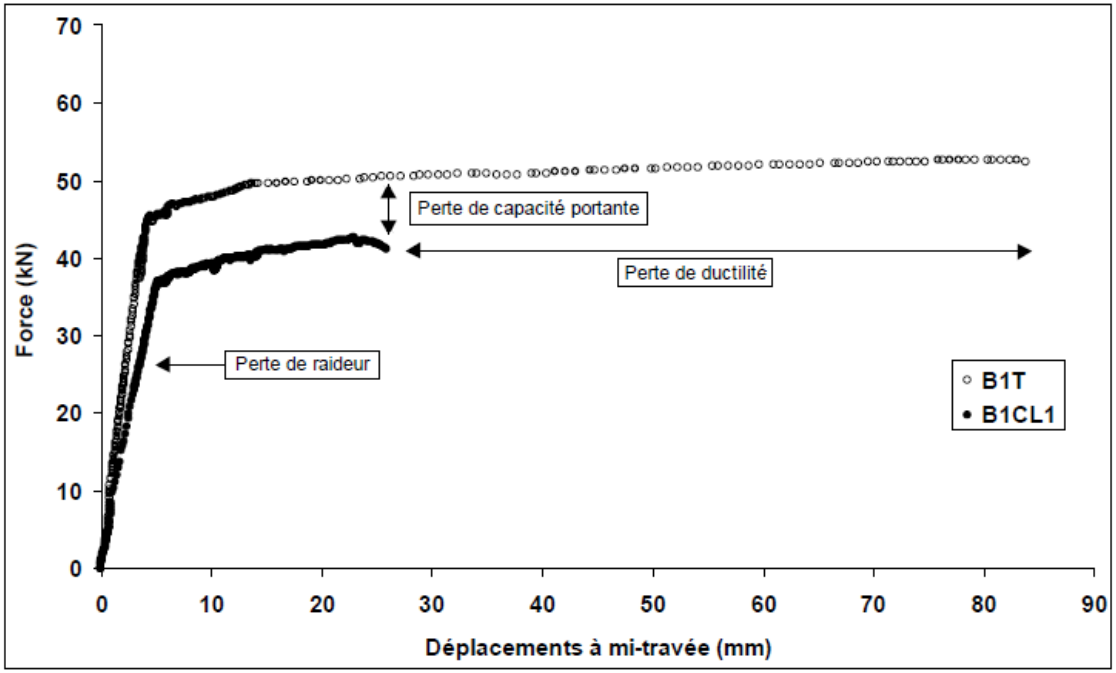


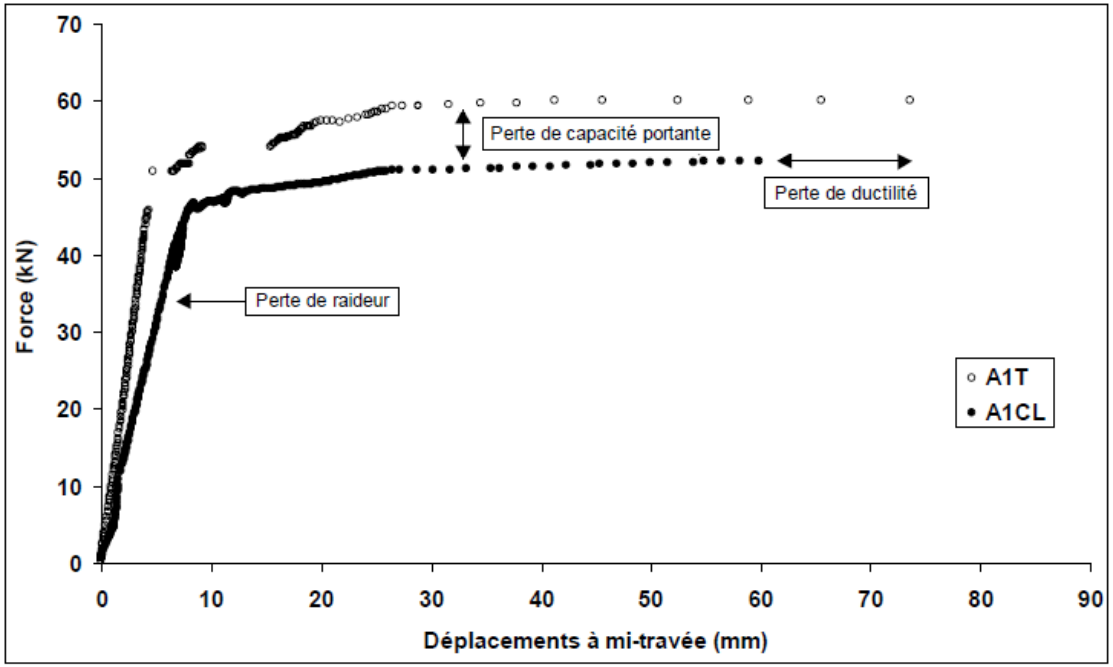


Fernandez et al., Cons. Build. Mat., 2020
(acier Ø10-12 mm, f_y=500 MPa, L=315 mm)

Alté… pou…es

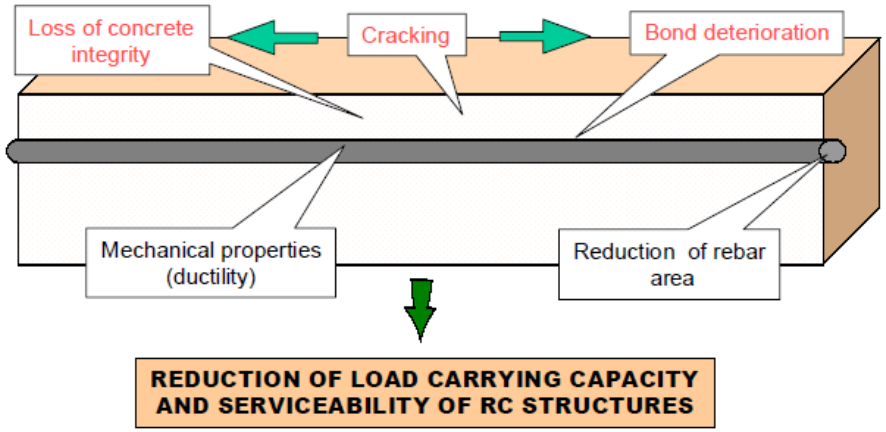




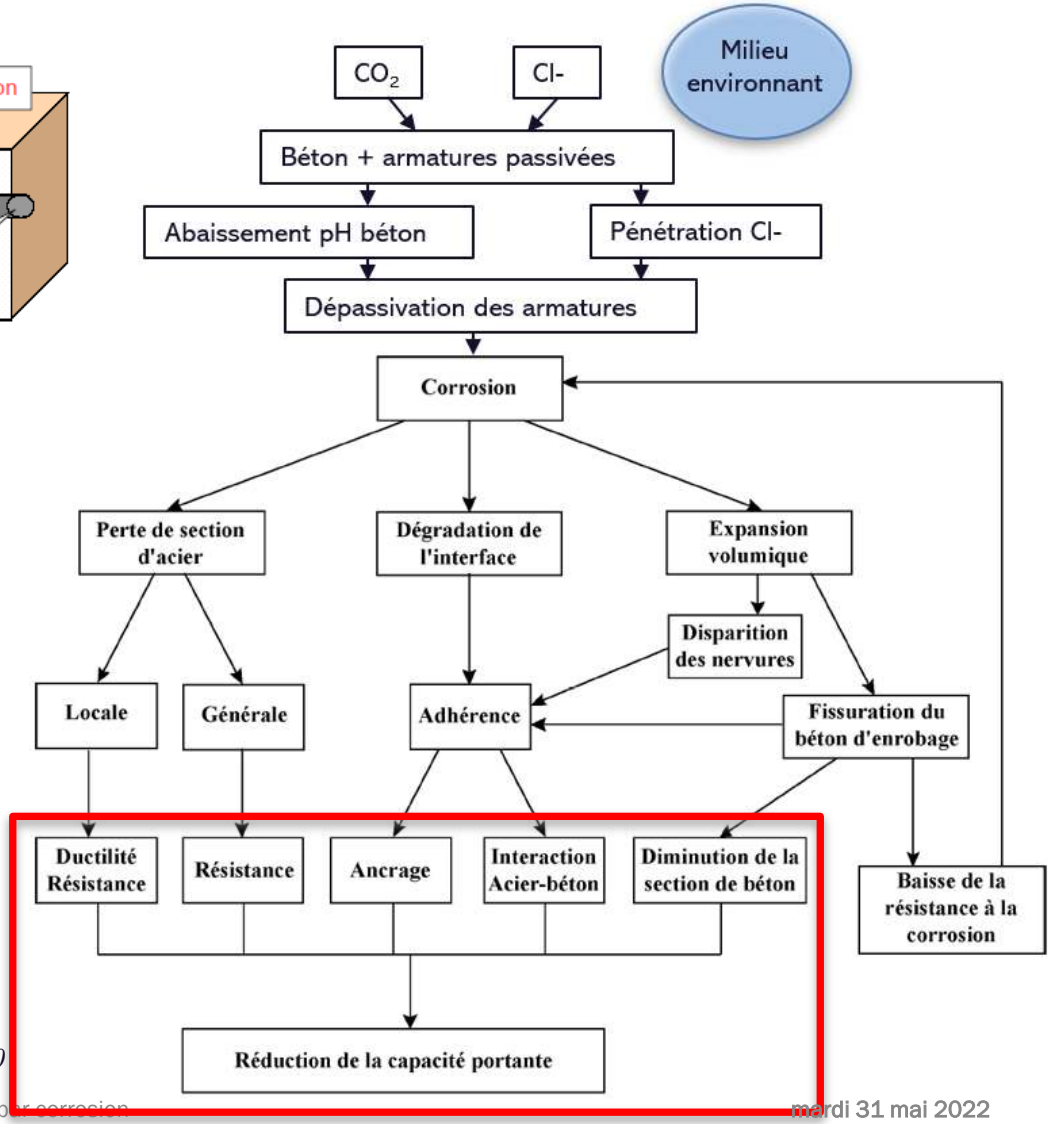


…al et al., Cem. Conc. Res., 2004

Phénomènes induits par la corrosion qui impactent la capacité portante



CONTECVET



d'après fib Bulletin 10

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Finalité =** estimer le **niveau de sécurité résiduel** de l'ouvrage existant corrodé
- Nécessité le plus souvent d'une **analyse croisée** entre **expert en corrosion** et **expert en mécanique des structures**
- Tentative d'approche proposant un **modèle robuste, de faible coût de calcul**, capable de prendre en compte de manière satisfaisante les **phénomènes physiques**

➔ Application de la **section 5 de l'EN 1992-1-1** « Analyse structurale » en considérant des **adaptations / précautions.**

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

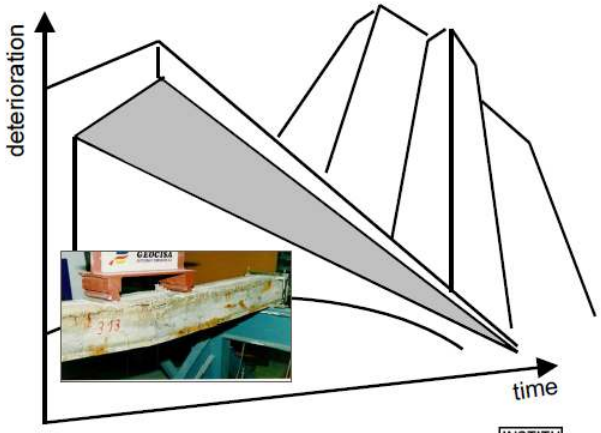
- Principales références :

EC Innovation Programme
IN30902I

CONTECVET
A validated Users Manual for assessing the residual service life of concrete structures

Manual for assessing corrosion-affected concrete structures

2001



GEOCISA
GEOTECNIA Y CIMIENTOS, S.A.

INSTITUTO EDUARDO TORROJA

Bulletin 80



December 2016

Partial factor methods for existing concrete structures

A.3.3 Models for corrosion-damaged structures

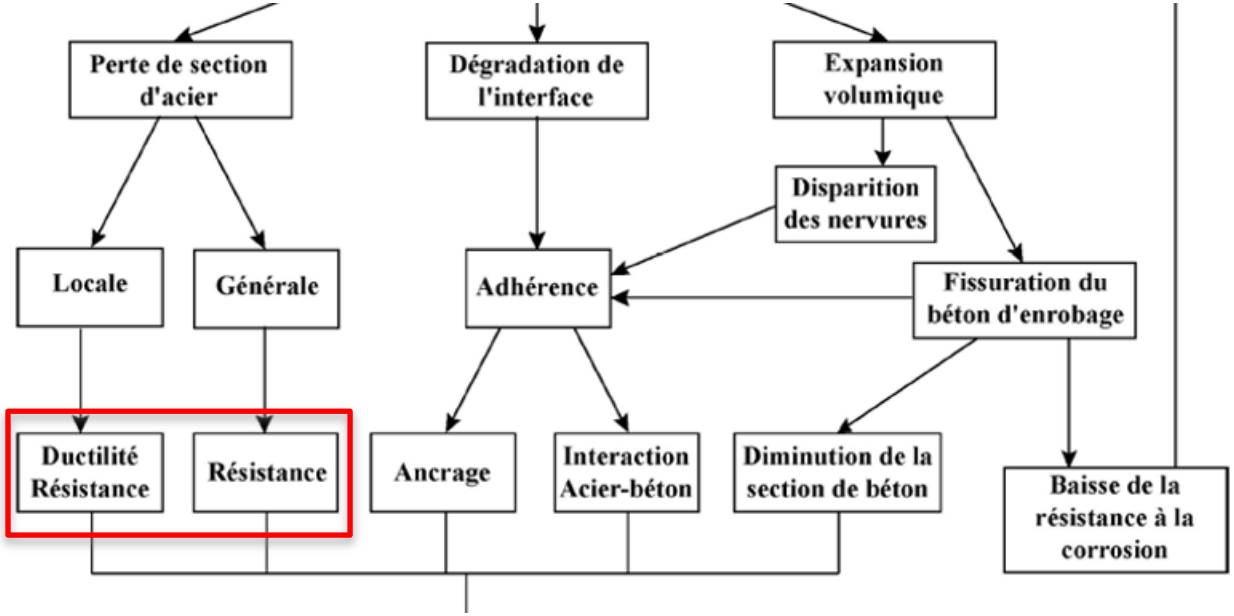
fib

Recommendation

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

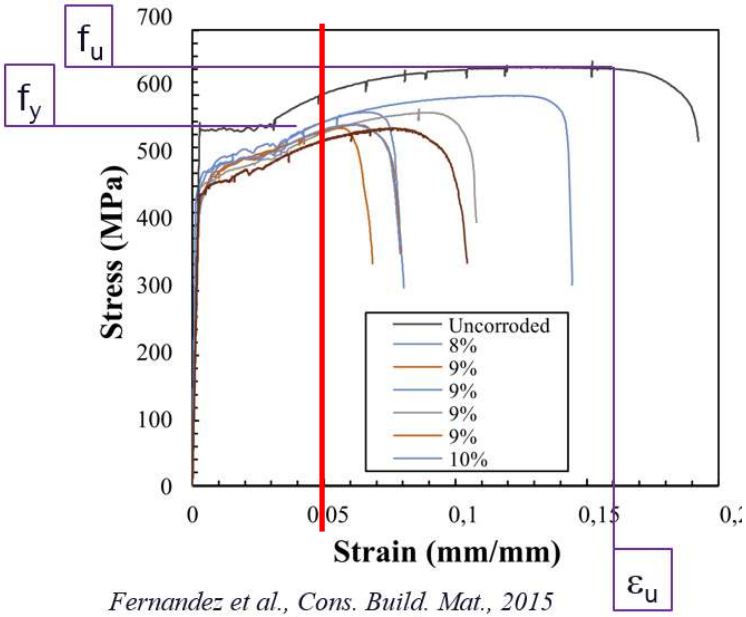
- Propriétés mécaniques de l'acier corrodé



Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Propriétés mécaniques** de **l'acier corrodé:**
  - Pas de modification de f_u, f_y
  - Perte de ductilité :



Fernandez et al., Cons. Build. Mat., 2015
(acier Ø10 mm, f_y=500 MPa)

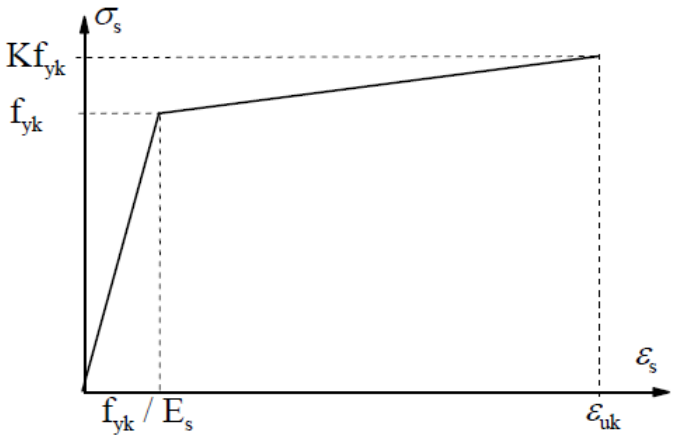


Fig./Tab.6.(5) Diagramme contraintes-déformations des aciers de béton armé

ε_{uk}	déformation relative et k selon la classe des armatures		
	pour la classe B	$\varepsilon_{uk} \geq 5\%$	$k \geq 1{,}08$
	pour la classe C	$\varepsilon_{uk} \geq 7{,}5\%$	$1{,}15 \leq k < 1{,}35$

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Propriétés mécaniques** de **l'acier corrodé:**
  - **Pas de modification de f_u, f_y**
  - **Perte de ductilité :**

➔ **allongement aciers corrodés** en général **> 5%** = valeur mini pour aciers à grande ductilité ➔ **dans ce cas**, on conserve **diagramme (σ,ε) de l'EN1992-1-1**

Attention : conséquences de la perte de ductilité des sections avec aciers corrodés:

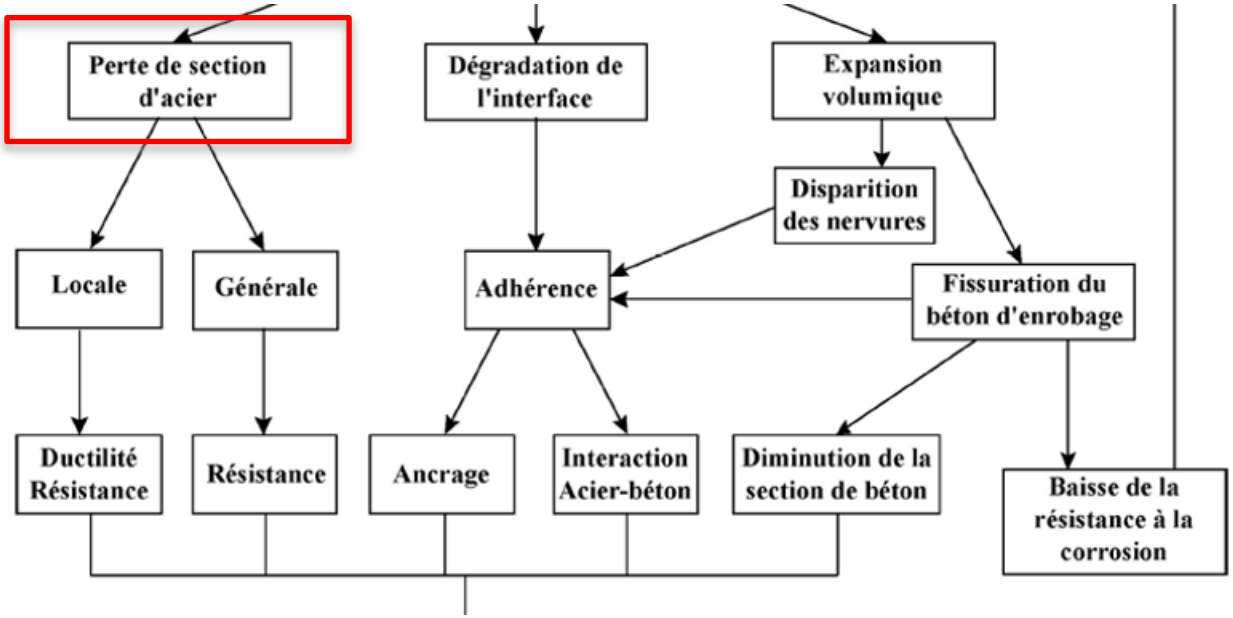
- **Altération** de la **capacité de rotation à l'ELU** ➔ vigilance si
  - <u>En statique :</u> analyse **élastique-linéaire avec redistribution limitée** des moments **ou analyse plastique**
  - <u>Sous séisme</u>, prise en compte de **comportement ductile (coefficient de comportement)**

➔ **Privilégier <u>analyse élastique</u> pour structures affectées par la corrosion**

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

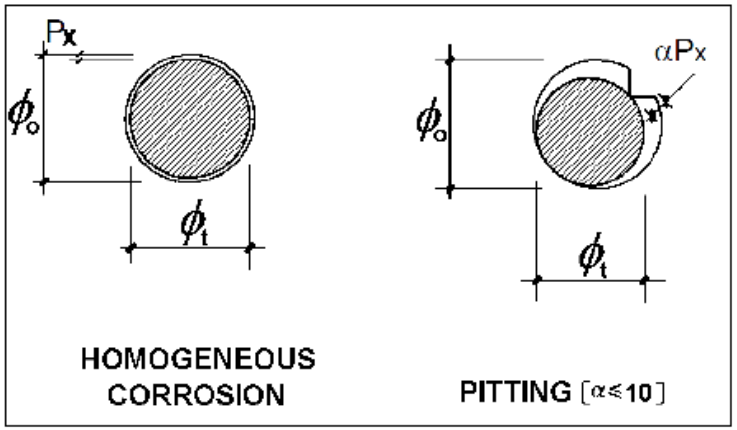
- Prise en compte de la **section résiduelle d'armatures**



Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- Prise en compte de la **section résiduelle d'armatures** $\phi_t = \phi_0 - \alpha P_x$



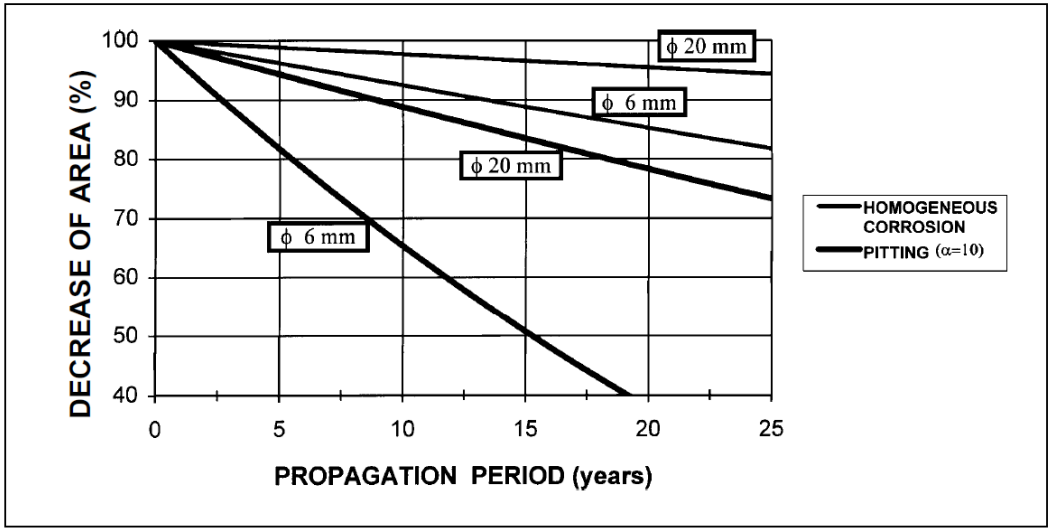


Figure F2 Decrease of bar sectional area for I_{corr} = 1 µA/cm².

CONTECVET

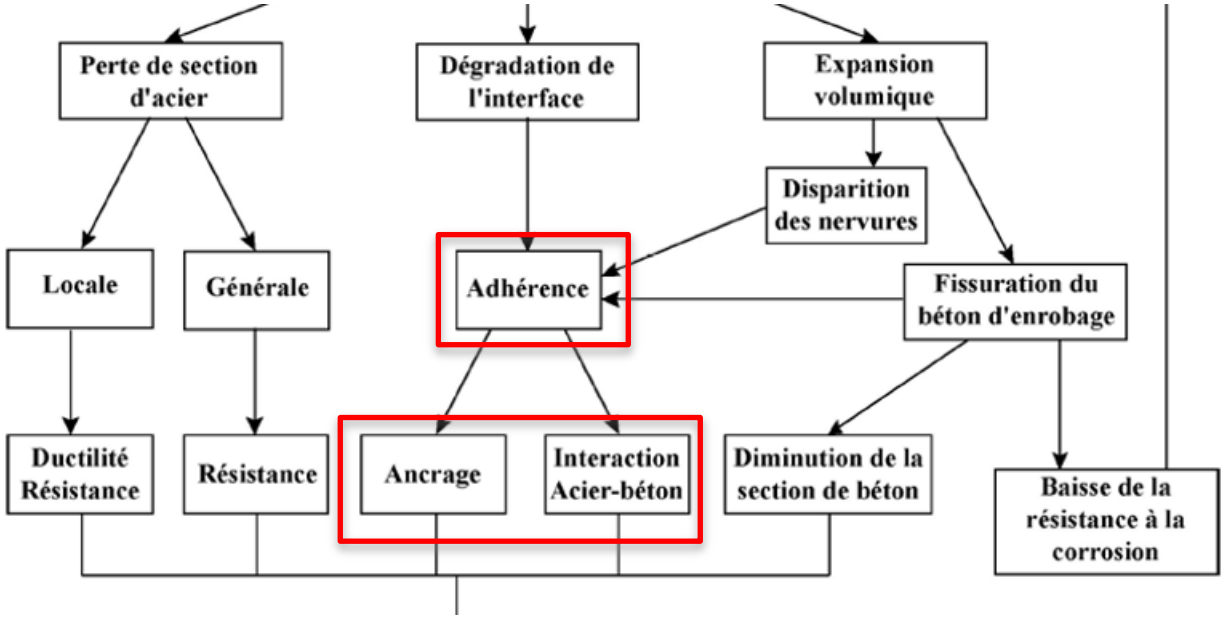
P_x = valeur moyenne de perte de rayon

α = coefficient dépendant du type d'attaque :
- corrosion homogène (carbonatation) : α=2;
- corrosion localisée (Cl-): α jusqu'à 10

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- Perte d'adhérence / ancrage



Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- Perte d'adhérence / ancrage
  - **détérioration de l'adhérence** doit être prise en compte et l'ancrage vérifié, car le **transfert de force entre le béton et l'acier corrodé doit être assuré** avant de considérer les différents modes de défaillance
  - Différentes **expressions expérimentales** permettant de déterminer une adhérence dégradée données dans §F,2,3 de CONTECVET

F.2.3. Bond

Expressions developed to determine how attack penetration affects bond deterioration are the following:

If $\rho > 0.25$ $f_b = 4.75 - 4.64\ P_x$ [f.7]

If $\rho < 0.25$ $f_b = 10.04 + [-6.62 + 1.98\ (\rho/0.25)]\ [1.14 + P_x]$ [f.8]

$\rho = n\ [(\phi_w - \alpha\ P_{x\,w}) / \phi]^2$

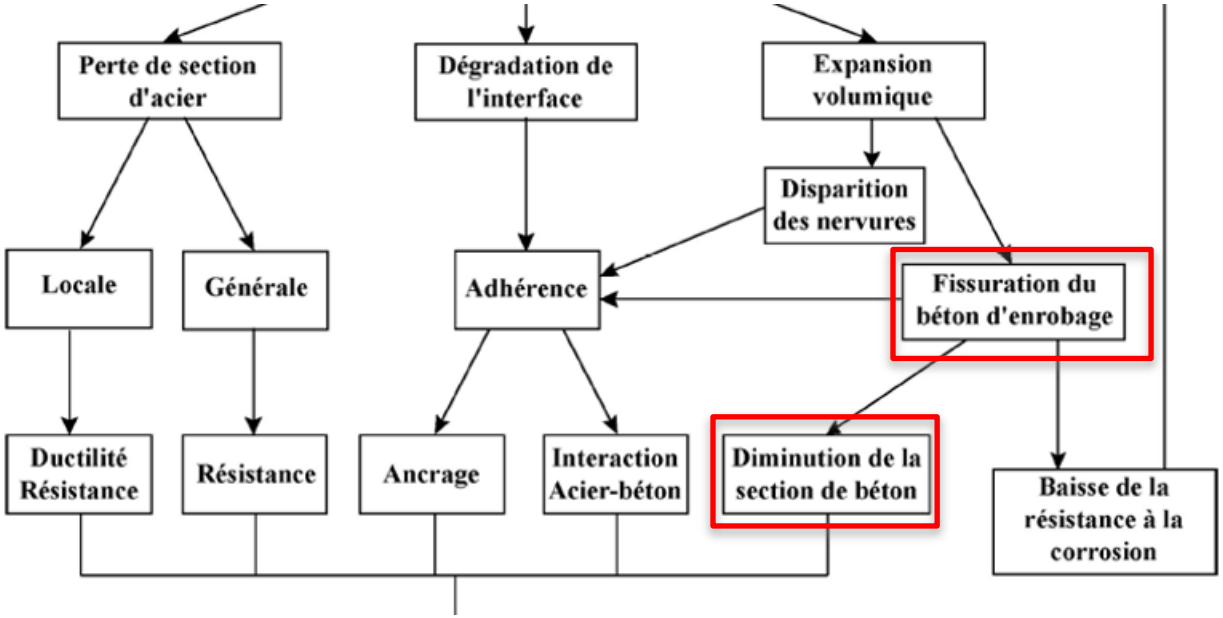
where:

P_x	is the average value of attack penetration at main bars, in mm.
$P_{x\,w}$	is the average value of attack penetration at transverse bars, in mm
ϕ	is the diameter of the main bar, in mm.
ϕ_w	is the diameter of the transverse bar, in mm.
α	2 (homogenous corrosion at transverse reinforcement) ≤ 10 (pitting at transverse reinforcement)
n	is the number of transverse bars at anchorage length of the main bar

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Fissuration de l'enrobage** due à la formation des produits de corrosion

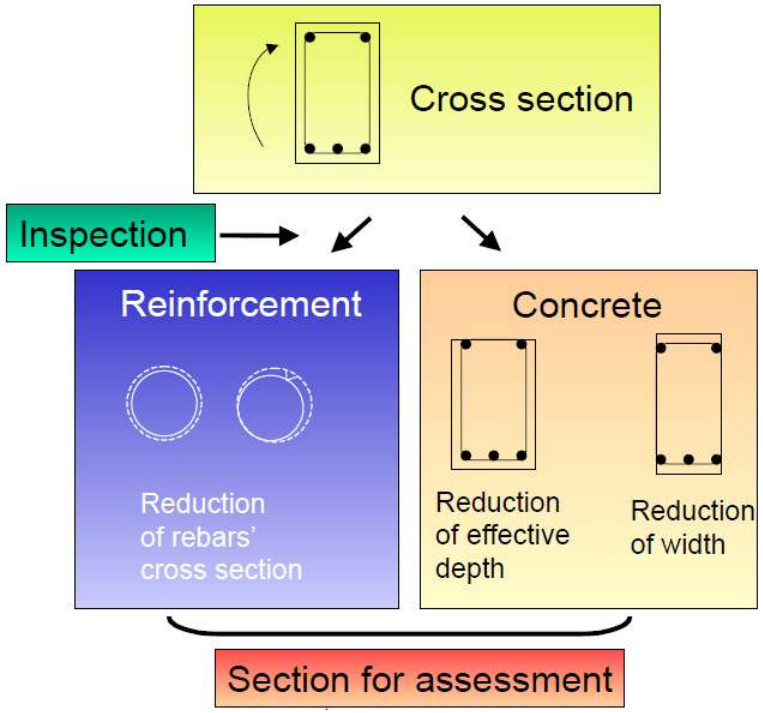


Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Fissuration de l'enrobage** due à la formation des produits de corrosion

Section de BA à prendre en compte :



CONTECVET

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Fissuration de l'enrobage** due à la formation des produits de corrosion
  ➔ **calcul en fourchette de la section BA à l'ELU** *(fib bull80):*

- **Fourchette haute = section béton complète** avec **résistance à la compression du béton réduite $k_c.f_c$.**
  - k_c fonction de **facteur de fragilité $\eta_{fc} = (30/fc)^{1/3}$** qui réduit la résistance pour bétons de fc > 30 MPa de comportement plus fragile (*fib MC2010*).
  - béton confiné : kc =1,0.ηfc.
  - Élément comprimé présentant des fissures dues à la corrosion des aciers comprimés, parallèles aux aciers : kc = 0,75.ηfc. (*fib MC2010* bielles avec fissures // direction de la compression).
  - distribution rectangulaire des contraintes supposée pour le béton en flexion pure.

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

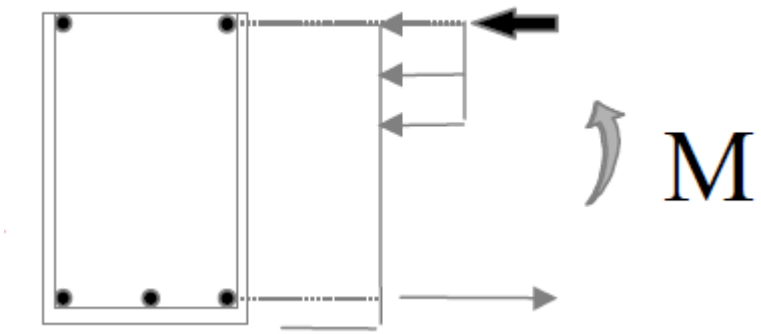
Prise en compte des différents phénomènes

- **Fissuration de l'enrobage** due à la formation des produits de corrosion
  ➔ calcul en fourchette de la section BA à l'ELU *(fib bull80):*

- **Fourchette haute = section béton complète** avec **résistance à la compression du béton réduite $k_c.f_c$.**

- **Fourchette basse =** fissuration du béton d'enrobage **➔ enrobage négligé selon inspections**

Par exemple enrobage négligé dans la zone de compression



Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Fissuration de l'enrobage** due à la formation des produits de corrosion: estimation **moment ultime en flexion** *(CONTECVET)*

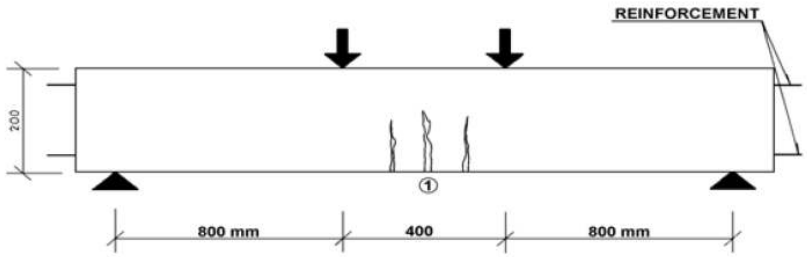


Figure F12 *Type of failure in beams with low tensile reinforcement ratio.*

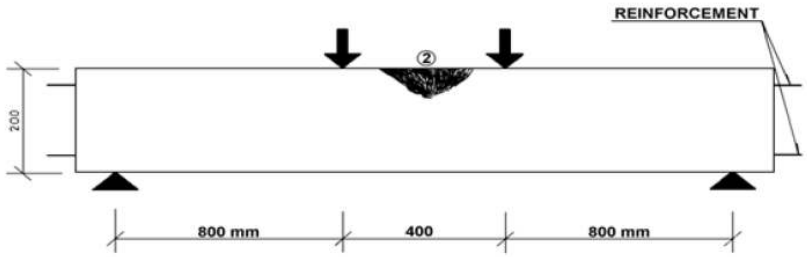


Figure F13 *Type of failure in beams with high tensile resinforcement ratio.*

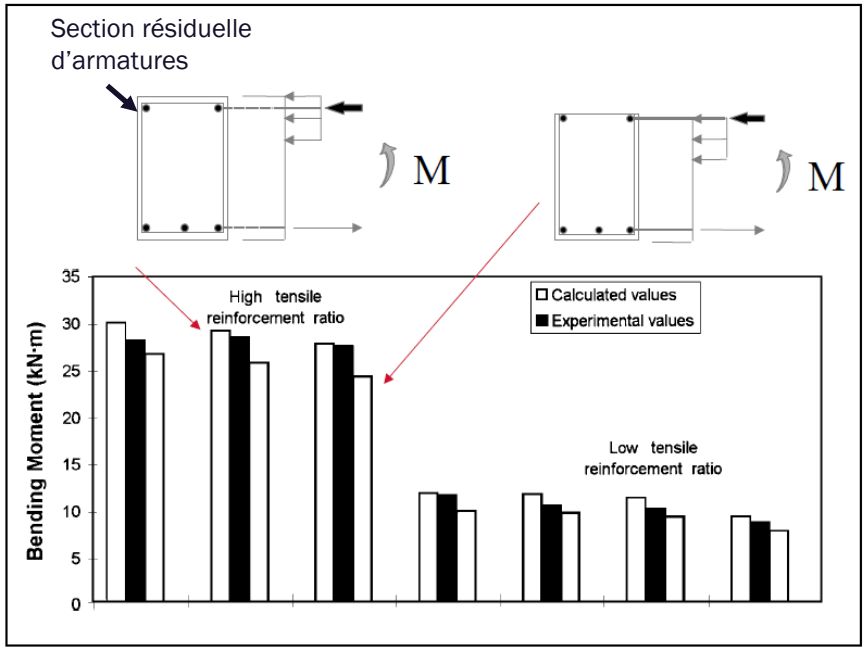


Figure F14 *Ultimate bending moment in beams with corroded reinforcement.*

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Fissuration de l'enrobage** due à la formation des produits de corrosion: estimation **effort tranchant ultime** *(CONTECVET)*

- Résultats expérimentaux : rupture poutres corrodées essentiellement par **cisaillement** :
  - Corrosion des cadres
  - fissuration de l'enrobage comprimé produit par la corrosion des armatures comprimées et des cadres
  - fissuration de l'enrobage latéral produit par la corrosion des cadres

- Attention :
  - mode de **rupture fragile** !
  - risque de **flambement des armatures longitudinales comprimées** si perte de section des cadres, non intégré dans cette approche !

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- **Fissuration de l'enrobage** due à la formation des produits de corrosion: estimation **effort tranchant ultime** *(CONTECVET)*

➔ Estimation **conservative** de l'effort tranchant ultime en **négligeant la contribution de l'enrobage**

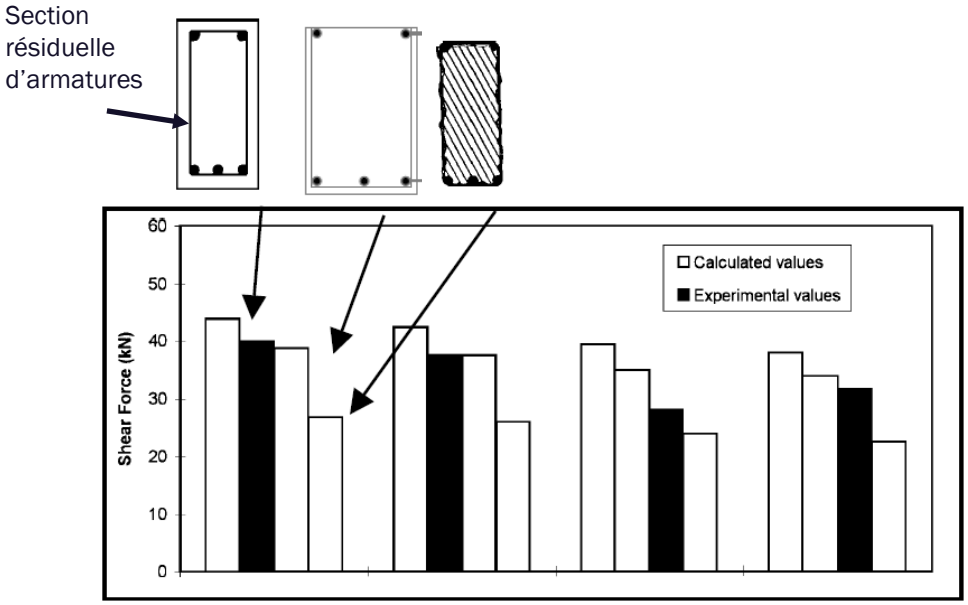
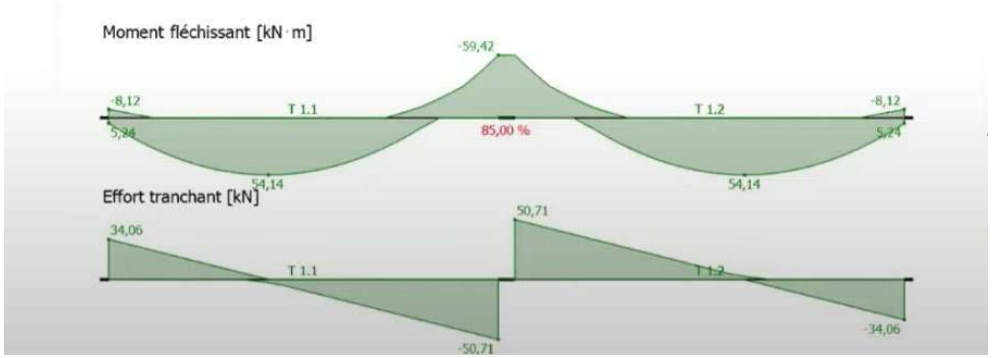


Figure F17 *Ultimate shear force in beams with corrode reinforcement.*

Modélisation de structures endommagées par la corrosion

Prise en compte des différents phénomènes

- Prise en compte des dégradations dans **calculs de sections**
- Ne pas oublier **l'approche globale de la structure** : la zone corrodée n'est pas forcément la plus critique



Conclusion

- **Corrosion = l'une des causes majeures** dégradant les structures en béton armé au cours de leur durée de vie
- **Évaluation** d'une structure en béton armé dégradée par corrosion ➔ **compréhension** du phénomène de corrosion des armatures ainsi que ses conséquences sur l'acier, le béton et l'interface acier/béton.
- Difficile de mettre en œuvre un **modèle robuste à faible coût de calcul**
- Méthodo présentée « **colle » aux phénomènes** et à la **pratique habituelle de la justification des sections BA à l'ELU selon l'EC2.**
- Doit être appliquée avec **prudence** du fait de la **dispersion importante des phénomènes** et du **nombre relativement limité de résultats expérimentaux**
- **L'évaluation d'une structure corrodée doit mobiliser des compétences en corrosion et en mécanique des structures**