

Projet National PERFDUB

PERFDUB

APPROCHE **PERFORMANTIELLE**
DE LA **DURABILITÉ**
DES OUVRAGES EN **BÉTON**



MODELISATION DU VIEILLISSEMENT DES OUVRAGES EN BETON ET DEFINITION DE CRITERES DE PERFORMANCE

Synthèse GT2B

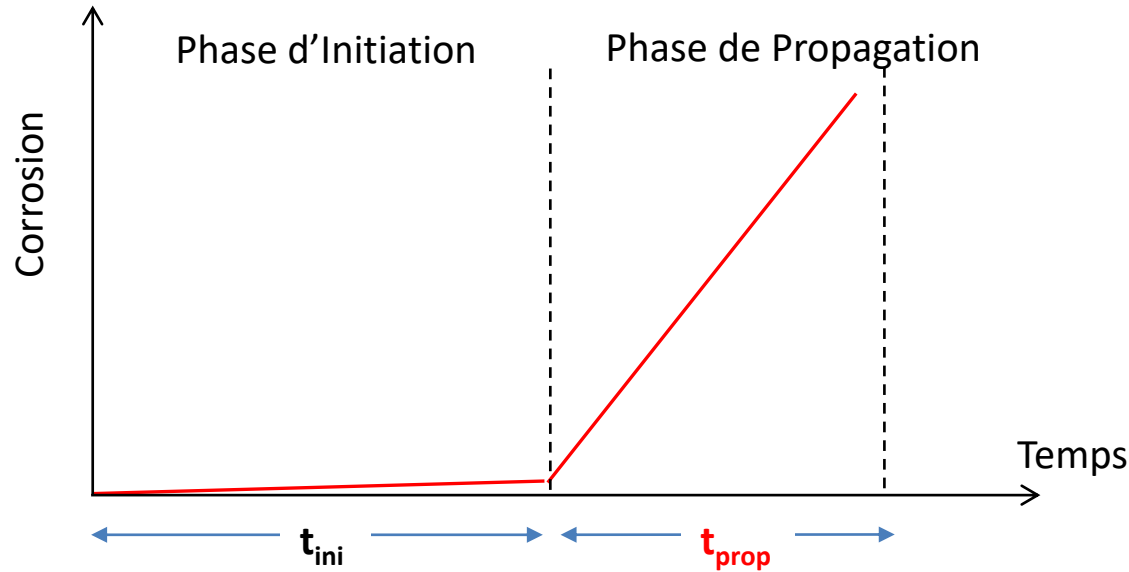
www.perfdub.fr

Myriam CARCASSES (LMDC)
François CUSSIGH (VINCI Construction)

- ▶ **Objectif global** : définir des seuils admissibles pour chaque classe d'exposition et pour différentes durées d'utilisation du projet et valeurs d'enrobages
- ▶ **Démarche** : S'appuyer sur la conjonction des approches de **modélisation**, de **caractérisation des bétons** considérés durables par les règles de composition de la norme et du diagnostic sur **ouvrages anciens** pour définir les critères de performance pertinents
- ▶ **Objectif GT2B** : Définir un modèle ingénieur global capable de fournir une évaluation fiable de la durée d'utilisation des structures en béton armé soumises au risque de corrosion (classes XS-XD et XC)
- ▶ **Approche modélisation** : basée sur les retours d'expérience et les modèles existants – **Choix sécuritaires**



► **Représentation classique du processus de corrosion des armatures**



Durée d'utilisation du projet : $t_{\text{final}} = t_{\text{ini}} + t_{\text{prop}}$

La phase de propagation de la corrosion doit être prise en compte :
 sinon XC1 serait plus à risque que XC4 !

Par exemple pour $v_{\text{acc}} = 2 \text{ mm/j}^{1/2}$ et $r_0 = 50 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ – DUP = 50 ans

$$t_{\text{ini XC1}} = 9 \text{ ans} \quad \text{et} \quad t_{\text{ini XC4}} = 37 \text{ ans}$$

$$t_{\text{prop XC1}} > 50 \text{ ans} \quad \text{et} \quad t_{\text{prop XC4}} = 13 \text{ ans} \dots$$



Classe d'exposition :
HR, Température, Climat,
[CO₂], [O₂], [Cl] etc.

Matériau : Valeurs caractéristiques
Indicateurs de durabilité (porosité,
permeabilité, coefficient de
diffusion, teneur en CH, vitesse de
carbonatation accélérée, ...)

Phase d'initiation : à
partir des modèles de
la *fib* (chlorure et
carbonatation)

Phase de
propagation

$$t_{ini} + t_{prop}$$



1. DONNEES D'ENTREE

Propriétés du matériau : v_{nat} OU $v_{acc} - r_0$

Données liées à l'environnement : **Température** – **Classe d'exposition**
Durée d'utilisation de projet (DUP)



2. VALEURS INTERMEDIAIRES

$t_{ini} - t_{prop} - i_{corr} - X_{crit}$



3. DONNEE DE SORTIE

t_{final}



► **t_{ini} carbonatation : modélisation de la phase d'initiation**

Modèle basé sur la 1ère loi de Fick : évolution du front de carbonatation en racine carrée du temps

$$X_c(t) = v_{nat} k_{HR} k_c \sqrt{t_{eff}}$$

1 paramètre matériau :

- **v_{nat}**: Vitesse de carbonatation naturelle (mm/an^{1/2})

3 fonctions :

- **k_{HR}**: effet de HR (-)
- **k_c**: effet de la cure (-)
- **t_{eff}**: temps effectif de carbonatation (années) – cycles d'humidification/séchage

Classe d'exposition	Enrobage mini (mm) 50 ans (classe S4)	Enrobage mini (mm) 100 ans (classe S6)
XC1	15	25
XC2	25	35
XC3	25	35
XC4	30	40

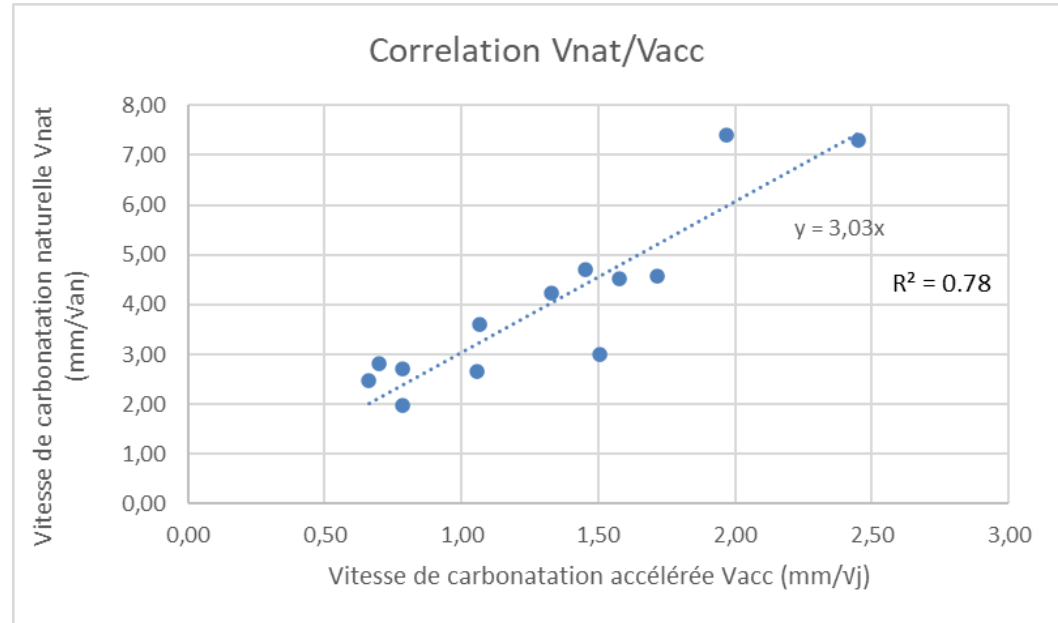
$$C_{char} = C_{min} + 4,5 \text{ mm}$$



- v_{acc} : Vitesse de carbonatation accélérée (mm/ \sqrt{j} our)
- v_{nat} : Vitesse de carbonatation naturelle (mm/ \sqrt{an})

Données Perfdub : Corrélation entre v_{acc} and v_{nat}

Résultats de carbonatation accélérée cohérents avec les mesures de carbonatation naturelle in situ (extrait rapport de synthèse GT2A)



Le facteur 3 de corrélation v_{nat}/v_{acc} obtenu en labo et utilisé pour fixer les seuils est sécuritaire

Structure	v_{nat} (mm/an ^{0,5}) calculée	v_{acc} (mm/jour ^{0,5}) mesurée	Ratio v_{nat}/v_{acc} (jour/an) ^{0,5}
Vachette culée	2,85	1,19	2,4
St Poncy	4,37	2,13	2,1
Bruche (corrodé)	4,47	1,44	3,1
Blondel chevêtre	4,85	1,55	3,1
		Moyenne	2,7

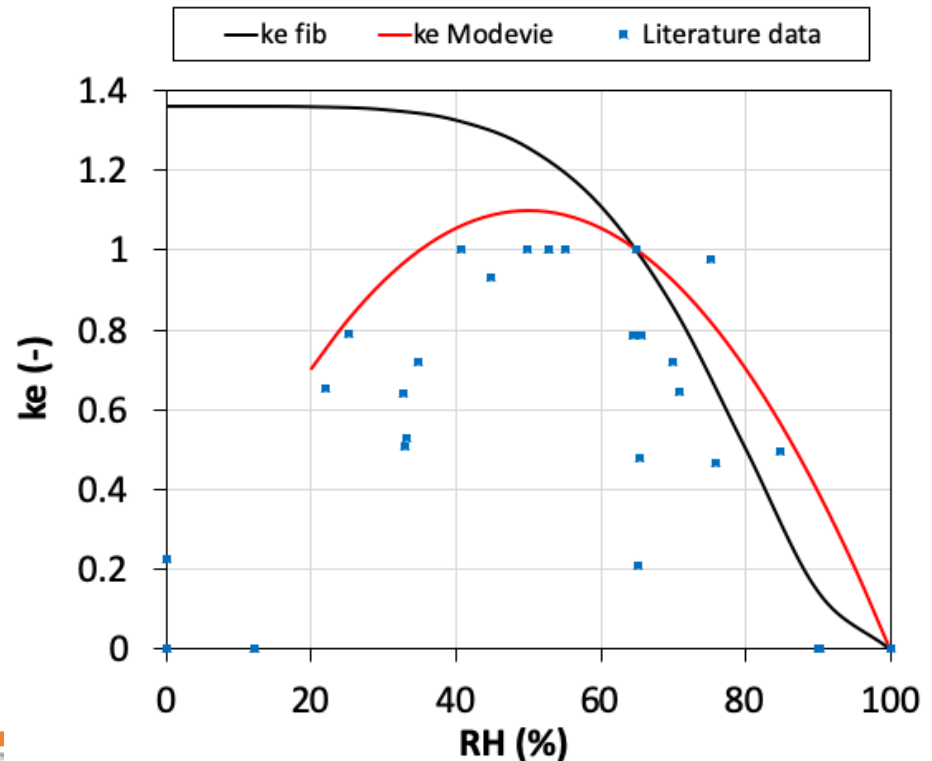
► t_{ini} carbonatation : modélisation de la phase d'initiation

$$k_{HR} = 1.1 \left(1 - \left(\frac{(HR - 50)}{50} \right)^2 \right)$$

- Optimum à 50% (plateau entre 50 et 65% HR)
- **Fonction parabolique** : plutôt sécuritaire comparé aux données de la littérature
- $k_{HR} = 1$ pour HR=65%

Classe d'exposition	HR
XC1	50
XC2	90
XC3	75
XC4	65

HR : valeur la plus défavorable



► t_{ini} carbonatation : modélisation de la phase d'initiation

Définition d'un temps de carbonatation effective :

$$t_{\text{eff}} = t - (t_w + t_d) = (1 - (1 + \beta_w)ToW).t$$

t : temps d'exposition total

t_w : temps d'humidification total lié à la pluie

t_d : temps nécessaire pour que le «front de séchage» atteigne le front de carbonatation

En simplifiant avec 2 paramètres :

$$\beta_w = \text{cst} = 1.5 \text{ (Vu et al., 2019)}$$

ToW : proportion du nombre de jours de pluie par an – seuil : 10 mm (au lieu de 2,5mm pour la fib)

Classe d'exposition	ToW
XC1	0.00
XC2	0.00
XC3	0.00
XC4	0.05

CLIMDEX : <https://www.climdex.org>



► **t_{prop} carbonatation : modélisation de la phase de corrosion**

1. Calcul de la densité de courant de corrosion

$$i_{corr} = V_0 \cdot \frac{k_{HR} \cdot k_T}{\rho_0} \quad (\mu\text{A}/\text{cm}^2)$$

- $V_0 = 168.9 \mu\text{A} \cdot \Omega\text{m} \cdot \text{cm}^{-2}$
- r_0 [$\Omega \cdot \text{m}$] résistivité électrique du béton en conditions saturées - Classe XC1 : résistivité multipliée par 10 pour tenir compte des environnements en permanence secs (Lifecon 20004 pp 108 - idem Duracrete model 2000)
- Influence de la température : $k_T = e^{-4220(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})}$
- Influence de HR (HR en fonction de la classe d'exposition idem diapo 5):

$$k_{HR} = \frac{1}{\left(\frac{HR - HR_{crit}}{c}\right)^2 + 1} \quad HR_{crit} = 95\% \text{ et } c = 6$$

Prise en compte de la résistivité : spécificité des liants moins riches en clinker (permettant en particulier de ne pas disqualifier les CEM III ou autres CEM II/C ou CEM VI), en accord avec le retour d'expérience

2. Calcul de la Vitesse de corrosion : V_{corr} ($\mu\text{m}/\text{an}$)

$$V_{corr} = \frac{\Delta s}{\Delta t} = \frac{M_{Fe}}{\rho_s \cdot F \cdot z} i_{corr} = 11.61 i_{corr} \quad (\text{Loi de Faraday})$$



► t_{prop} carbonatation : modélisation de la phase de corrosion

3. Calcul de X_{crit} la perte de section des armatures correspondant à l'apparition d'une fissure d'ouverture 0.1 mm à la surface de l'ouvrage

$$X_{\text{crit}} = 11 \left(\frac{C_{\text{char}}}{D} \right) \left(\frac{C_{\text{char}}}{L} + 1 \right)^2 \quad \text{Torres-Acosta et al (2004)}$$

C_{char} = enrobage caractéristique (mm)

D = diamètre d'armature

L = longueur anodique (mm)

Hypothèse : Carbonatation correspond à une corrosion uniforme
 donc $\frac{C}{L}$ tend vers 0

4. Calcul de la durée de propagation de la corrosion

$$t_{\text{prop}} = \frac{X_{\text{crit}}}{V_{\text{corr}}} \quad (\text{années})$$



Classes d'exposition XC : Evaluation du modèle sur ouvrages anciens

Ouvrage	Vitesses de carbonatation		Mesure carbonatation		Paramètres météo et cure				Coefficient de temps effectif		Carbonatation calculée
	V _{acc} mm/vj	V _{nat} mm/van	Age (an)	Xc(t) (mm)	HR (%)	ToW	k _{HR}	kc	β _w (-)	coeff	Xc(t) (mm)
Bruche	1,44	4,34	66	30	65	0,05	1	1	1,5	0,88	33
Blondel	1,55	4,68	47	35	65	0,05	1	1	1,5	0,88	30
Vachette	1,19	3,56	34	17	65	0,05	1	1	1,5	0,88	19



► Seuils de performance : Méthodologie et hypothèses

Prise en compte de plusieurs approches pour fiabiliser la définition de critères de durabilité appropriés :

- Utilisation des modèles de vieillissement MODEVIE (initiation et corrosion), affinés grâce au REX sur ouvrages anciens du PN : modélisation PerfDuB
- Comparaison avec les modélisations effectuées dans le cadre de la normalisation européenne (ERC)
- Détermination des performances des bétons conformes ou non aux règles de limite de composition de la norme NF EN 206/CN (base de données du PN)



► Durée d'utilisation 50 ans

Critère de performance (90% valeurs caractéristiques)					
Classe d'exposition	Modulation basée sur des classes de résistivité à 90j ($\Omega.m$)	Limite de vitesse de carbonatation accélérée (mm/vjour)			
		Base de données (S4)	Modèle Perfdub (S4 - S3 - S2)	ERC (S4-S3-S2)	PERFDUB synthèse (S4 - S3 - S2)
XC1	< 100	2,3	4	4 - 2,6 - 1,4	4 - 3 - 2,2
	100 à 175		4		
	> 175		4		
XC2	< 100	2,3	3,5 - 2,9 - 2,3	3 - 2,2 - 1,8	3 - 2,6 - 2,2
	100 à 175		3,5 - 2,9 - 2,3	3 - 2,6 - 1,8	3,5 - 3 - 2,2
	> 175		3,6 - 2,9 - 2,3	3,5 - 2,6 - 1,8	
XC3	< 100	2,0	1,7 - 1,4 - 1,1	1,8 - 1,4 - 1	1,8 - 1,4 - 1
	100 à 175		1,8 - 1,5 - 1,2	2,2 - 1,8 - 1	2,2 - 1,8 - 1,4
	> 175		2,0 - 1,6 - 1,2	2,2 - 1,8 - 1,4	
XC4	< 100	2,0	2,0 - 1,7 - 1,3	2,2 - 1,8 - 1,4	1,8 - 1,4 - 1
	100 à 175		2,4 - 2 - 1,5	2,6 - 1,8 - 1,4	2,2 - 1,8 - 1,4
	> 175		4 - 3 - 2	2,6 - 2,2 - 1,8	3 - 2,6 - 1,8



► Durée d'utilisation 100 ans

Classe d'exposition	Critère de performance (90% valeurs caractéristiques)				
	Modulation basée sur des classes de résistivité à 90j ($\Omega.m$)	Limite de vitesse de carbonatation accélérée (mm/vjour)			
		Base de données (S6)	Modèle Perfdub (S6 – S5 – S4)	ERC (S6 – S5 – S4)	PERFDUB synthèse (S6 – S5 – S4)
XC1	< 100	1,8	4	4 - 3 - 1,8	4 - 3 - 1,8
	100 à 175				
	> 175				
XC2	< 100	1,8	3,3 - 2,9 - 2,4	2,6 - 2,2 - 1,8	2,6 - 2,2 - 1,8
	100 à 175		3,3 - 2,9 - 2,4	3 - 2,2 - 1,8	3 - 2,6 - 1
	> 175		3,3 - 2,9 - 2,4		
XC3	< 100	1,6	1,6 - 1,4 - 1,2	1,8 - 1,4 - 1	1,8 - 1,4 - 1
	100 à 175		1,7 - 1,4 - 1,2		
	> 175		1,8 - 1,5 - 1,3		
XC4	< 100	1,7	1,7 - 1,5 - 1,3	1,8 - 1,4 - 1	1,8 - 1,4 - 1
	100 à 175		1,9 - 1,6 - 1,4	2,2 - 1,8 - 1,4	
	> 175		2,4 - 2 - 1,6		2,2 - 1,8 - 1,4



1. DONNEES D'ENTREE

Propriétés du matériau : $\varphi - D_{rcm}(t_0) - \alpha_A$ ou *composition du liant* - r_0

Données liées à l'environnement : *Température - Classe d'exposition*

Durée d'utilisation du projet (DUP)



2. VALEURS INTERMEDIAIRES

$t_{ini} - t_{prop} - C_{S,\Delta x} - \Delta x - D_m(t) -$
 $i_{corr} - S_a$



3. DONNEE DE SORTIE

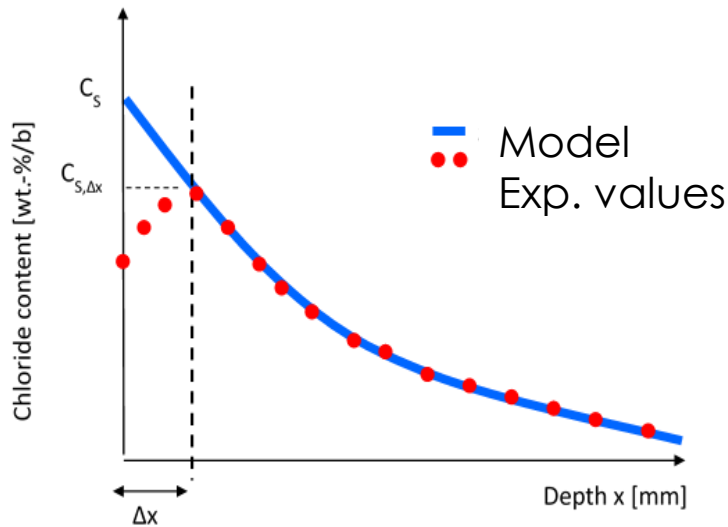
t_{final}



► t_{ini} : modélisation de la phase d'initiation

- Modèle basé sur la 2nde loi de Fick (semblable au modèle de la *fib*)
- Profil exprimé en chlorures libres (% masse de liant) en fonction du temps

$$C(x, t) = C_0 + (C_{S,\Delta x} - C_0) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_m(t) \cdot t}} \right) \right]$$



4 paramètres :

- C_0 : teneur initiale en chlorure (% masse de liant) ~ 0 (respect EN-206)
- $C_{S,\Delta x}$: concentration maximale en chlorure à la surface (% masse de liant)
- Δx : profondeur de la concentration maximale de surface (m)
- $D_m(t)$: coefficient de diffusion moyen à l'instant t (m^2/s)

Paramètres déterminés à partir d'indicateurs de durabilité et de facteurs environnementaux



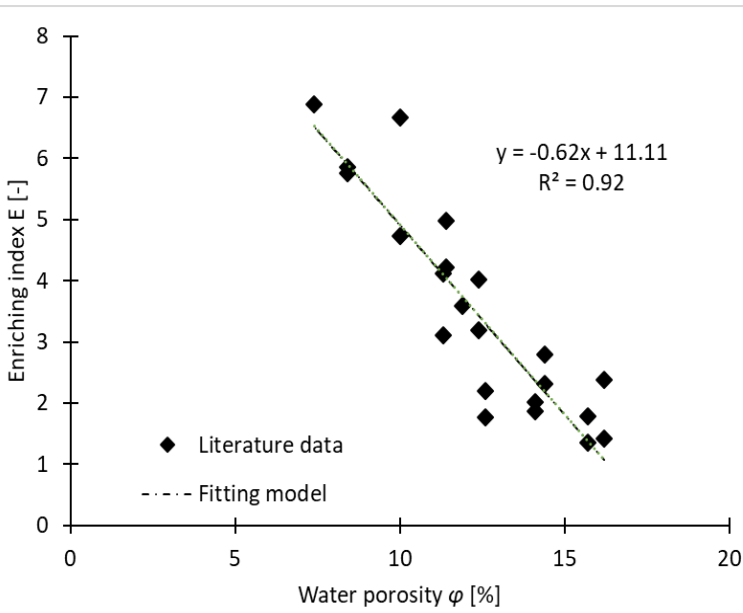
Concentration maximale en chlorure libre à la surface : $C_{S,\Delta x} = E \cdot C_{sat} \cdot s$ avec $C_{sat} = \varphi \frac{C_{env}}{M_b}$

C_{sat} : concentration en chlorure libre pour une saturation complète de la porosité du béton par l'eau environnante e.g. eau de mer (% masse de liant)

C_{env} : concentration en chlorure dans l'environnement (en fonction de la classe d'exposition)

M_b : teneur en liant (kg/m³) s : coefficient partiel de sécurité

E : coefficient d'enrichissement (-) – Fonction linéaire de la porosité φ et de la classe d'exposition



Classe d'exposition	s : coefficient partiel de sécurité	Coefficient d'enrichissement	C_{env} : concentration en chlorure de l'environnement (g/l)
XS1	1.3	E=1	22
XS2	1.3	E=1,81	22
XS3	1.5	E=11,11-0,62φ	22
XD3	1.9	E=(11,11-0,62φ)/3	22
XD2	1.9	E=1,81	10



► **t_{ini} : modélisation de la phase d'initiation**

- Profondeur de la concentration maximale de surface :

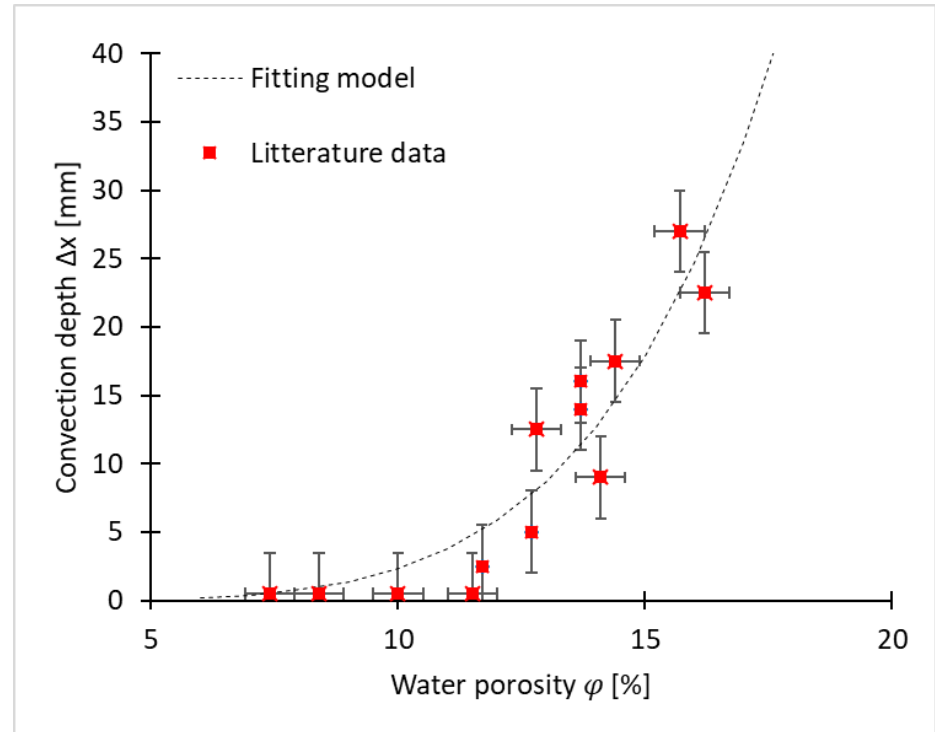
$\Delta x = f(\varphi)$ pour XS3/XD3 (autres classes $\Delta x = 0$)

Avec : $\Delta x = 0.45 \left(\frac{\varphi}{\varphi_s}\right)^5 \Delta x_0$

φ : porosité accessible à l'eau (%)

φ_s : seuil en porosité = 11.5%

$\Delta x_0 = 10$ mm



► t_{ini} : modélisation de la phase d'initiation

- Coefficient de diffusion apparent moyen : $D_m(t)$

$$D_m(t) = k_T \left(\frac{t_0}{t_{\text{th}}} \right)^{\alpha_M} \left[\frac{(1-\alpha_M)t + \alpha_M t_{\text{th}}}{(1-\alpha_M)t} \right] D_{\text{rcm}}(t_0)$$

Avec : $D_{\text{rcm}}(t_0)$: EN 12390-18 coefficient de migration des chlorures à t_0 (m²/s)

t_{th} : seuil pour atteindre D_{RCM} constant = 10 ans

α_M : ageing factor (-)

k_T : fonction de la température (loi d'Arrhenius) (-)

- Ageing factor : $\left[\frac{t_0}{t} \right]^{(\alpha_M - \alpha_A)} = 1 - \alpha_M$

$$\alpha_A = 0.3 + \text{MIN}(0.2 \%BFS; 0,15) + \text{MIN}(1.1\%FA; 0,3) + \text{MIN}(1.1\%SF; 0,1) + 0 \%MK$$

Avec les taux de remplacement en additions exprimés en % de la masse de liant

CEM I	0.3		
Coeff BFS	0.2	Max BFS	0.45
Coeff FA	1.1	Max FA	0.6
Coeff SF	1.1	Max SF	0.4
Coeff MK	0	Max MK	0.3



► t_{ini} : modélisation de la phase d'initiation

- t_{ini} : temps pour lequel la concentration critique en chlorure C_{crit} atteint l'enrobage $c_{\text{min.dur}}$

$C_{\text{crit}} = 0.6 \% \text{ en masse de liant}$

Classe d'exposition	Enrobage mini (mm) 50 ans (classe S4)	Enrobage mini (mm) 100 ans (classe S6)
XS1	35	45
XS2	40	50
XS3	45	55
XD3	45	55
XD2	40	50

$C_{\text{char}} = C_{\text{min}} + 4.5 \text{ mm}$



► **t_{prop} : modélisation de la phase de propagation**

1. **Calcul de la densité de courant de corrosion**
$$i_{corr} = Y_{Cl} \frac{K_{Cl} K_C \frac{K_{O_2}}{\rho}}{\rho} \text{ (A/m}^2\text{)}$$

Avec :

K_{Cl} : paramètre lié à la contamination par des chlorures libres $\frac{(|Cl - C_{crit}| + Cl - C_{crit})^{0.89}}{0.08}$

avec Cl : concentration finale en chlorures libres à la fin de la DUP et C_{crit} = 0.6% liant

K_C : paramètre lié au ratio C/A = 4 (travaux C. Chalhoub)

K_{O₂} = 1 sauf pour XS2 à déterminer en fonction de la partie d'acier immergé et de la longueur de cathode mobilisable

$\rho = \rho_0 K_{HR}$ avec ρ_0 résistivité électrique en conditions saturées réalisée à 20 °C

$$k_{HR} = \left(\left(\frac{100}{HR} \right)^4 \right)^d$$
 avec HR = 100 % sauf pour XS1 où HR = 75%

d = facteur lié aux périodes de séchage

Vitesse de corrosion constante calculée à partir de la concentration en chlorures en fin de durée de vie



2. Perte de section d'acier provoquant l'apparition des fissures induites par la corrosion

$$S_a = A_s \left[1 - \left[1 - \frac{2 \cdot Pr_{O_2} \cdot p_{fg}}{D} \left(7.53 + 9.32 \frac{c}{D} \right) 10^{-3} \right]^2 \right] \quad (\text{mm}^2)$$

Modèle empirique

[C. Alonso *et al.* (1998)
 modifié par T. Vidal *et al.* 2004]

Avec:

S_a : perte de section locale conduisant à l'initiation d'une fissuration par corrosion (m²)

D : diamètre nominal de la barre d'acier (m)

A_s : section transversale de l'armature (m²)

c : épaisseur d'enrobage (m)

p_{fg} : facteur de piquûre

Pr_{O_2} : lié à la pression des produits de corrosion en fonction de la disponibilité en oxygène
 avec 1 pour les classes d'exposition XS1 et XS3 et 2,5 pour la classe XS2



3. Prédiction de la durée de propagation de la corrosion

$$t_{prop} = \mu \left(\frac{S_a}{D} \right) \left(\frac{1}{K i_{corr}} \right)$$

Loi de Faraday : $\mu = \frac{\rho_s Z F}{2 M \tan(\varphi)} = 5.07E+10 \text{ A.s/m}^3 = 1629 \text{ A.an/m}^3$

K : Le courant de corrosion contribue à la pénétration en profondeur ainsi qu'à l'extension latérale de la zone anodique

On suppose que seulement 50% de la densité de courant contribue à la perte de section transversale de l'acier



Classes d'exposition XS3 : Evaluation du modèle sur ouvrages anciens

Pont	Ile de Ré	Rion-Antirion
Type de ciment	CEM II/A-S (10% laitier)	CEM III/A (62% laitier)
D_{rcm} (m ² /s)	15.10 ⁻¹²	1.10 ⁻¹²
Facteur de vieillissement α	0,37	0,52
Δx (mm)	11	4
Résistivité ($\Omega.m$)	72	350
Calcul t_{ini} (an)	2	128
Calcul t_{prop} (an)	8	71
$t_{ini} + t_{prop}$ calculé (an)	10	199
$T_{ini} + t_{prop}$ effectif (an)	< 35	<i>A suivre...</i>



► Durée d'utilisation : 50 ans

		Critère de performance (90% valeurs caractéristiques)			
Classe d'exposition	Modulation basée sur ageing factor	Limite du coefficient de migration des chlorures (10^{-12} m ² /s)			
		Base de données (S4)	Modèle PERFDUB (S4 - S4 poro < 13,5%)	ERC (S4)	PERFDUB synthèse (S4 - S4 poro < 13,5%)
XS1	0,30 à 0,39	34	19 - 26	11	16 - 28
	0,40 à 0,49		30	19	28
	0,50 à 0,59		50	33	
	0,60 et plus		90	56	
XS2	0,30 à 0,39	34	6 - 7	2,4	5 - 9
	0,40 à 0,49		8,5	4,1	9
	0,50 à 0,59		14 - 16	6,9	16
	0,60 et plus		27 - 30	11,8	
XS3e	0,30 à 0,39	17	5	5	5
	0,40 à 0,49		7	9	9
	0,50 à 0,59		12	16	16
	0,60 et plus		22	22	22
XS3m	0,30 à 0,39	17	2	1,6	2
	0,40 à 0,49		3	2,7	3
	0,50 à 0,59		5	4,6	5
	0,60 et plus		10	7,8	9



► Durée d'utilisation : 100 ans

Critère de performance (90% valeurs caractéristiques)					
Classe d'exposition	Modulation basée sur ageing factor	Limite du coefficient de migration des chlorures (10^{-12} m ² /s)			
		Base de données (S4)	Modèle PERFDUB S6 – S6 poro < 13,5%	ERC (S6)	PERFDUB synthèse S6 – S6 poro < 13,5%
XS1	0,30 à 0,39	17	16 - 22	11	9 - 16
	0,40 à 0,49		28 - 36	19	22
	0,50 à 0,59		50	33	
	0,60 et plus		90	56	
XS2	0,30 à 0,39	17	4 - 5	2,4	3 - 5
	0,40 à 0,49		7,5 - 8	4,1	5
	0,50 à 0,59		13 - 14	6,9	9
	0,60 et plus		28 - 31	11,8	
XS3e	0,30 à 0,39	10	4	5	5
	0,40 à 0,49		7	9	9
	0,50 à 0,59		13	16	16
	0,60 et plus		26	22	22
XS3m	0,30 à 0,39	10	2	1,6	2
	0,40 à 0,49		3	2,7	3
	0,50 à 0,59		5	4,6	5
	0,60 et plus		13	7,8	9



► Originalité du modèle PerfDuB

- Prise en compte des phénomènes physico-chimiques pour les risques de corrosion des armatures
- Paramètres d'entrée facilement accessibles pour l'ingénieur car mesurables en utilisant des modes opératoires normalisés

► Robustesse du modèle PerfDuB

- Données issues de la littérature sur les différents mécanismes liés à la migration du CO₂ ou des chlorures et à la corrosion des armatures
- Résultats expérimentaux de la base de données du Projet National Perfdub (42 bétons)
- Observations effectuées sur des ouvrages anciens exposés à différentes conditions environnementales
- Variabilité des paramètres d'entrée
- Comparaison des durées d'utilisation calculées par le modèle aux durées visées dans les normes (50 ou 100 ans)



► Données d'entrée du modèle en classes XC

- **Pour le matériau** : la vitesse de carbonatation (naturelle ou accélérée) et la résistivité
- **Pour l'ouvrage** : la durée d'utilisation du projet (classe structurale)
- **Pour l'environnement** : la classe d'exposition et la température.

► Données d'entrée du modèle en classes XS-XD

- **Pour le matériau** : la composition du liant, le coefficient de migration des chlorures, la porosité accessible à l'eau et la résistivité,
- **Pour l'ouvrage** : la durée d'utilisation du projet (classe structurale),
- **Pour l'environnement** : la classe d'exposition et la température.



► Classes XC

- Le temps de propagation t_{prop} ne peut être négligé
- Pour t_{ini} : performance mesurée via carbonatation accélérée v_{acc}
- Pour t_{prop} : prise en compte de la résistivité électrique pertinente

► Classes XS-XD

- Le temps d'initiation t_{ini} est le plus influent
- Pour t_{ini} : prise en compte de l'ageing factor indispensable



Merci pour votre attention

