



## Résultats obtenus sur les ouvrages existants

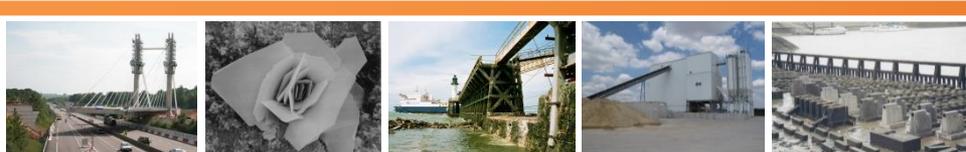
### Synthèse du GT2a

[www.perfdub.fr](http://www.perfdub.fr)

*Bruno GODART (Université Gustave Eiffel)*  
*Michael DIERKENS (Cerema)*

## Avec les contributions des partenaires suivants :

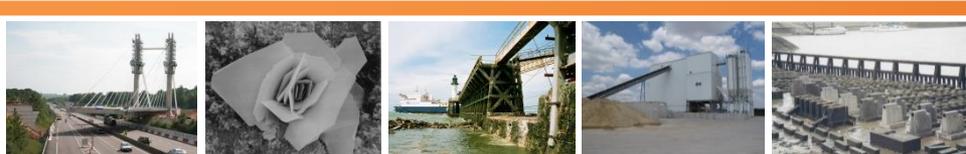
- ▶ **CEREMA** : Nathalie Cordier, Benoit Thauvin, Christophe Aubagnac, Arnaud Campaner, Bruno Boulet, Bruno Bérenger, Ronan Quéguiner et Thomas Fanget
  - ▶ **Université Gustave Eiffel** : Véronique Baroghel-Bouny, Véronique Bouteiller, Lucas Bourreau et Mickaël Saillio
  - ▶ **LRMH** : Héloïse Jourdan et Myriam Bouichou
  - ▶ **LERM** : Abdelkrim Ammouche, Alexa Bresson, Christophe Carde et Thibault Lenormand
  - ▶ **GINGER CEBTP** : Mélodie Neang et Stéphanie Delair
  - ▶ **CERIB**
- ▶ Remerciements aux propriétaires des différents ouvrages



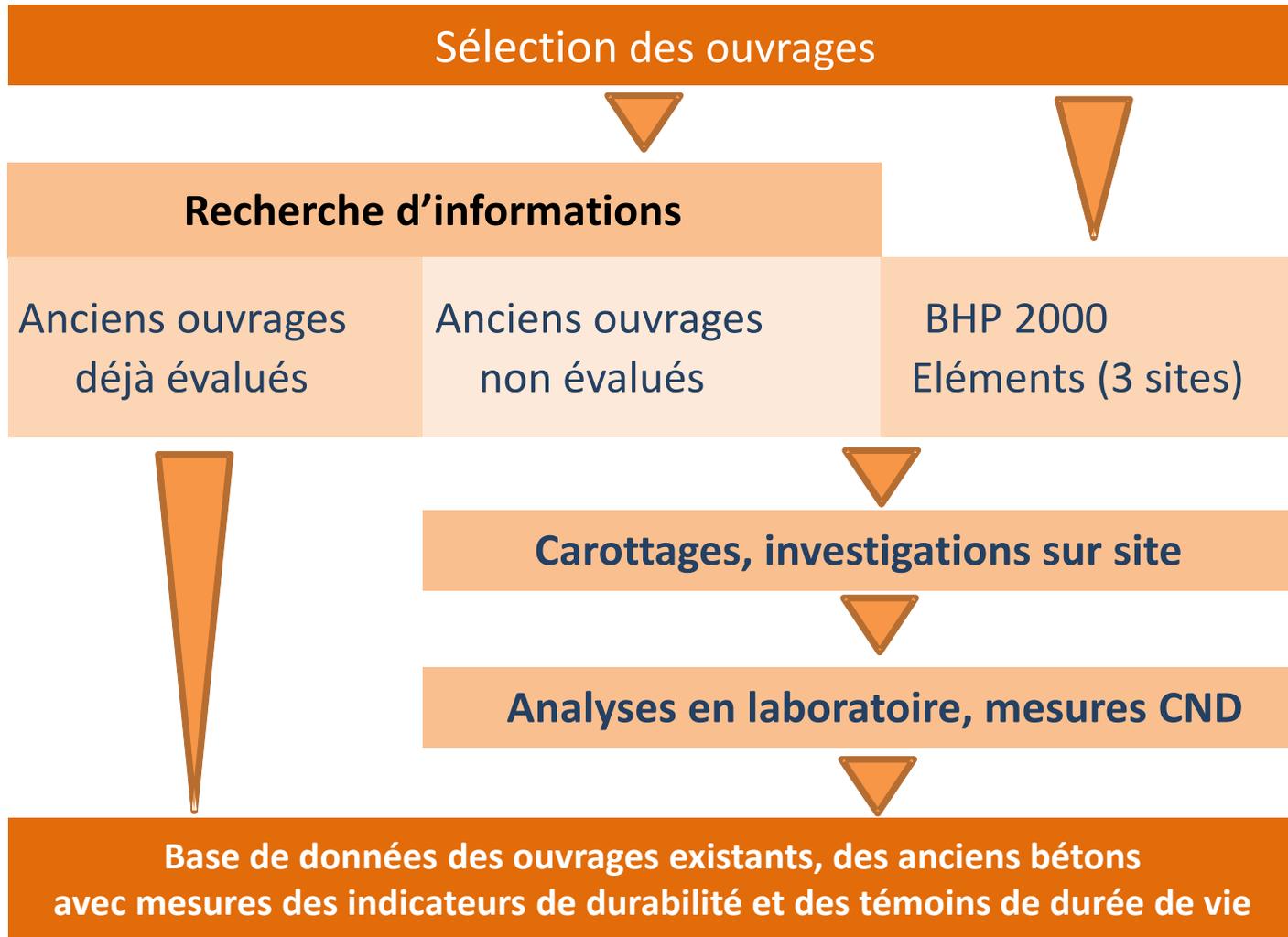
- ▶ **Pour fixer la valeur seuil des indicateurs de durabilité, et pour valider les modèles de corrosion, il est important de prendre en compte le retour d'expérience que l'on peut acquérir sur le comportement réel des ouvrages existants**
- ▶ **19 structures sélectionnées et évaluées (ponts, quais, monuments historiques, barrage, plus des corps d'épreuves BHP 2000) afin de :**
  - Construire une **base de données des indicateurs de durabilité** (porosité à l'eau, diffusion des chlorures, perméabilité au gaz, carbonatation accélérée, absorption d'eau, etc.)
  - Elaborer une **base de données des témoins de durée de vie** (profils de pénétration des chlorures, profondeurs de carbonatation, potentiels d'électrode, résistivité électrique, présence de désordres, état de corrosion, etc.)
  - Conduire une **analyse poussée de l'évolution des indicateurs de durabilité en parallèle avec une analyse de l'état des structures**, en tenant compte des modèles de corrosion développés dans le projet ANR MODEVIE



- ▶ **Ouvrages affectés par la corrosion due à la carbonatation ou à la pénétration des chlorures et structures soumises au gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage** : seuls les ouvrages situés dans des environnements XC, XS and XF/XD sont par conséquent étudiés
- ▶ **Ouvrages divisés selon leur âge en 3 catégories**
  - **Ouvrages agés de moins de 20 ans** : en donnant priorité aux ouvrages qui ont déjà fait l'objet (si possible) d'une approche performantielle de la durabilité à la construction (toutes les informations requises sont accessibles sans avoir besoin de procéder à des essais sauf, peut-être, ceux relatifs à la mesure des indicateurs de durabilité à l'heure actuelle)
  - **Ouvrages entre 20 et 50 ans d'âge** : en donnant priorité aux ouvrages qui ont déjà fait l'objet d'un diagnostic de leur état datant de moins de 5 ans, et en mesurant les indicateurs de durabilité et autres informations manquantes...
  - **Ouvrages agés de plus de 50 ans** : en donnant aussi priorité aux ouvrages qui ont déjà fait l'objet d'un diagnostic de leur état datant de moins de 5 ans, et en mesurant les indicateurs de durabilité et autres informations manquantes...



## ► Analyse des bétons des ouvrages anciens

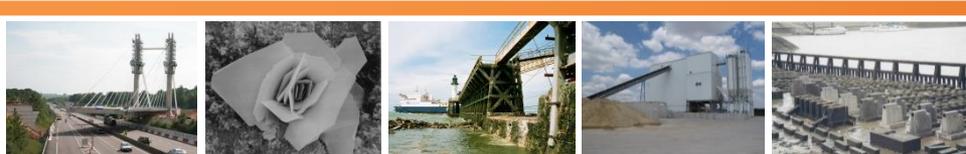


Age	Classes d'exposition		
	XC3-XC4	XS2-XS3	XF3-XF4-XD3
<b>Moins de 20 ans</b>	Corps d'épreuves BHP 2000 Pont de Loudéac (2014) Pont de Volesvres (2010-12)	Corps d'épreuves BHP 2000 Structure maritime X (2014) Pont de Rion-Antirion -Grèce (1999-2004)	Corps d'épreuves BHP 2000 -----
<b>Entre 20 et 50 ans</b>	-----	Pont Vasco de Gama (1995-98) Piles du pont de l'île de Ré (1987-1988) Pont Chateaubriand (1987-91)	Pont de St-Poncy (1988) Pont de la Vachette (1984-85) Pont du Pirou (1991)
<b>Plus de 50 ans</b>	PI SNCF/Blondel (1964) à Toulon Pont de La Bruche à La Broque (1947) Palais d'Iéna à Paris (1937) Bourse du Travail à Bordeaux (1935-38) Barrage de Vezins (1929-1932) Pont de Boutiron (1913)	Quai des TCD sur le Scorff (1965) Pont X (1954)	Pont des Vallières (1926)



## Données sur l'ouvrage

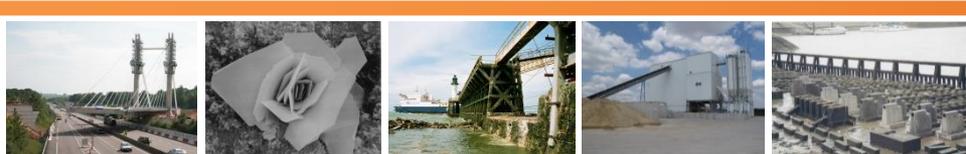
- Age de l'ouvrage
- Exposition passée et présente
- **Données déjà disponibles sur l'ouvrage :**
  - Règles appliquées pour la conception et l'exécution
  - Formulation détaillée du béton
  - Caractéristiques du béton frais (slump, air entraîné, masse volumique)
  - Coulage du béton et cure
  - Plans de ferrailage
  - Rapports d'inspection détaillée passées
  - Réparations effectuées
  - Indicateurs de durabilité (si mesurés pendant la construction)



Indicateurs de durabilité	Témoins de durée de vie
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porosité accessible à l'eau</li> <li>• Perméabilité au gaz</li> <li>• Coefficient de diffusion des chlorures (migration)</li> <li>• Résistivité électrique</li> <li>• Absorption d'eau par capillarité</li> <li>• Carbonatation accélérée</li> <li>• Et si possible : teneur en <math>\text{Ca(OH)}_2</math></li> </ul> <p><i>(selon les modes opératoires PerfDuB)</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Profondeur de carbonatation</li> <li>• Profils de chlorures (libre et total)</li> <li>• Profils de sulfates (selon le type de structure)</li> <li>• Epaisseur d'enrobage</li> <li>• Potentiels d'électrode (RILEM TC 154-EMC)</li> <li>• Résistivité électrique (RILEM TC 154-EMC)</li> <li>• Etat de la structure et de la corrosion des armatures (analyse éventuelle de l'interface acier / béton)</li> </ul>



- ▶ En l'absence d'informations sur la formulation initiale du béton, **une analyse minéralogique complète** a été menée sur un prélèvement de béton
- ▶ **Pour les structures en classe d'exposition XF**, les indicateurs suivants sont ajoutés
  - Facteur d'espacement des bulles d'air selon ASTM C 457
  - Gonflement selon l'essai de gel interne (normes NF P18-424 ou NF P18-425)
  - Rapport des carrés des fréquences de résonance selon la norme P18-414
  - Ecaillage selon la norme XP P18-420



## ► Procédure de prélèvement (pour indicateurs de durabilité)

- Carottes prélevées dans des zones où les conditions de la corrosion ont été diagnostiquées
- Trois carottes pour déterminer les indicateurs de durabilité** prélevées aussi loin que possible au coeur des parties de structure afin de s'affranchir des effets de l'environnement extérieur  
*(diamètre minimum : 95 mm et longueur minimum : 20 cm, sauf pour les deux monuments historiques où les carottes ont un diamètre de 50 mm)*

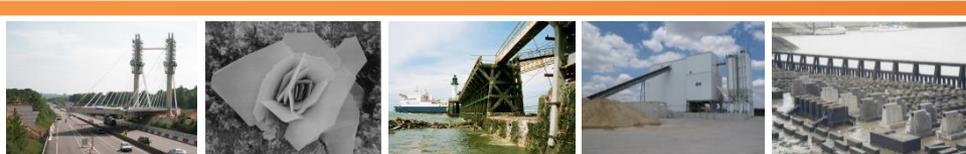
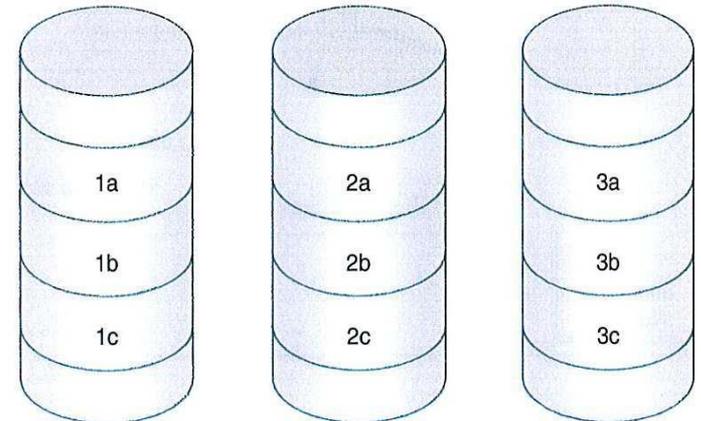
10 mm extrême de la carotte (mini) à éliminer

1a, 2a et 3a : Perméabilité au gaz (50 mm)

1b, 2b et 3b : Migration des ions chlorures (50 mm)

1c, 2c et 3c : Porosité à l'eau (50 mm)

10 mm extrême de la carotte (mini) à éliminer



Structure	Élément Investigué	Age	Résistance en compression	Classe exposition	Liant	$E_{eff}/L_{eq}$	Indicateurs de durabilité (à l'âge t des investigations)
Pont de la Bruche 1947	Tablier: Zone corrodée	66 ans (zone carbonatée)  70 ans (autres)	39.0 MPa	XC4	Ciment: 400 ± 40 kg  Laitier : en faible quantité	environ 0,6	$D_{rcm} = 4,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ $P_{eau} = 14,2 \%$ $C_{a,24h} = 5,48 \text{ kg}/\text{m}^2$ $C_{a,48h} = 6,06 \text{ kg}/\text{m}^2$ $k_{gaz} = 300 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ $X_{c28/56, 3\%} = 6,8 / 11,1 \text{ mm}$

$D_{rcm}$  : coefficient de migration obtenu en conditions non stationnaires

Res : résistivité électrique

w : perméabilité à l'eau

$P_{eau}$  : porosité à l'eau

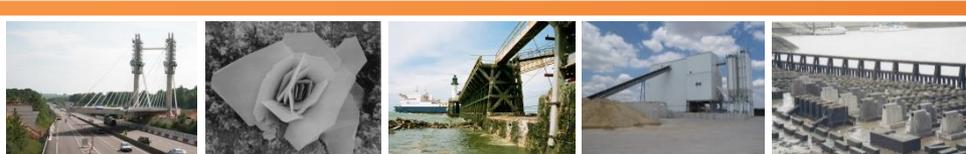
$k_{gaz}$  : perméabilité au gaz

$C_{a,xh}$  : coefficient d'absorption capillaire (mesuré à  $x = 24$  ou  $48$  h)

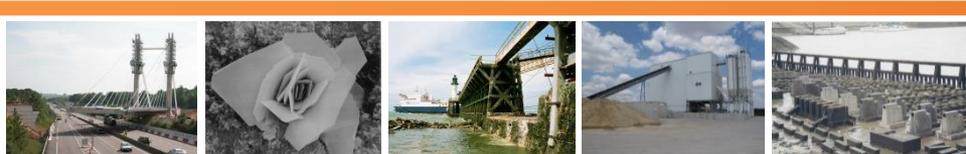
E : écaillage

$L_{barre}$  : facteur d'espacement des bulles d'air

$X_{c_{y/zj, w\%}}$  : carbonatation accélérée, à y and z jours, avec une teneur en  $\text{CO}_2$  de w%



Structure	Élément Investigué	Age	Résistance en compression	Classe d'exposition	Liant	$E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$	Indicateurs de durabilité (à l'âge t des investigations)
Pont de la Vachette 1984-1985	Corniche	34 ans	57,6 MPa (valeurs corrigées)	XF4	Ciment: 365 ± 35 kg CEM I	0,51	$D_{\text{rcm}} = 19,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ $P_{\text{eau}} = 14\%$ $k_{\text{gaz}} = 150 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ $C_{a, 24\text{h}} = 1,96 \text{ kg}/\text{m}^2$ $L_{\text{barre}} = 466 \mu\text{m} \text{ (2012)}$ $E = 7054 \text{ g}/\text{m}^2 \text{ (2012)}$
Pont de l'île de Ré	Pile P0	30 ans	64,5 MPa (carottes)	XS3 Zone de marnage	Ciment: 370 kg CEM II/A (10 % laitier)	0,50	$D_{\text{rcm}} = 15,1 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ $\text{Res} = 72 \Omega \cdot \text{m}$ $P_{\text{eau}} = 13,8 \%$ $k_{\text{gaz}} = 174 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ $C_{a, 24\text{h}} = 5,94 \text{ kg}/\text{m}^2$ $w = 1,28 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0,5}$



Structure	Élément investigué	Classe d'exposition	Front de carbonatation (mm) Teneur en chlorures libres à l'enrobage moyen Enrobage moyen (mm)	Etat de corrosion
Pont de la Bruche 1947	Tablier : Zone corrodée	XC4	Carbonatation : 25 mm  Profils de chlorures $Cl^-_{\text{libre, cmt, 3-4,5 cm}} = 0,12\%$  Enrobage : 41 mm	1988 : plusieurs sections d'aciers corrodés et des traces de rouille en intrados de la dalle. Plusieurs éclatements de béton avec des armatures partiellement dénudées et des aciers oxydés sur les faces latérales de la dalle, là où il y a des coulures d'eau en continu.  Entre 1988 et 1996 : pas de changement significatif.  Entre 1996 et 2001 : augmentation des éclatements de béton et apparition de nouveaux éclats. La corrosion est due à une insuffisance d'enrobage.

$Cl^-_{\text{libre, cmt, y-z cm}}$  : teneur en chlorures libres exprimée en pourcentage de masse de ciment



Structure	Élément investigué	Classe exposition	Front de carbonatation (mm) Teneur en chlorures libres à l'enrobage moyen Enrobage moyen (mm)	Etat de corrosion
Pont de la Vachette 1984-1985	Corniche	XF4	Carbonatation : Ext: < 8 mm Int : < 17 mm  Profils de chlorures $Cl^-_{\text{libre, cmt, 34-44 mm}} = 0,03\%$  Enrobage : 40 mm	2008 : nombreuses armatures corrodées apparentes, éclats de béton, écaillage et taches de rouille dus aux cycles de gel/dégel et à la pénétration de sels de déverglaçage.  2018 : de plus en plus d'éléments concernés. Les armatures présentent de sérieuses pertes de section. Le béton se dégrade de plus en plus profondément.
Pont de l'île de Ré 1987-1990	Pile Po (zone Z3)	XS3	Carbonatation : 0 mm Profils de chlorures : $Cl^-_{\text{libre, cmt, 50 mm}} = 0,26\%$ ; $Cl^-_{\text{libre, cmt, 85 mm}} = 0,00\%$ Enrobage : 85 mm	La zone Z3 (zone d'éclaboussures vs zone de marnage) est la plus endommagée.  Zone de marnage Z1 and Z2 : zones saines

$Cl^-_{\text{libre, cmt, y-z mm}}$  : teneur en chlorures libres exprimée en pourcentage de masse de ciment



Ouvrage / Année de construction	Élément investigué	Etat de corrosion
Bruche 1947	Dalle, zone corrodée	Propagation (avant 2000)
	Dalle, zone saine	Initiation
Chateaubriand 1987-1991	Piles P11 (embruns) et P14	Initiation
	Piles P11 (embruns) et P12 (marnage et éclaboussures)	Initiation
Quai des TCD 1964-1965	Intrados de la dalle du quai sud	Initiation
PI Blondel 1964	Chevêtre	Initiation
	Dalles	Initiation
Volesvre 2010-2012	Piles du pont	Initiation
	Tablier	Initiation
Loudéac 2014	Piédroit	Initiation
Bourse du Travail 1935-1938	Panneaux (voiles) de façade	Initiation
Palais d'Iéna 1937	Travées (poutres) de façade	Zone saine: initiation Zone corrodée : propagation
Pont de la Vachette 1984-1985	Corniche	Propagation à partir de 1996
	Culée	Propagation à partir de 1987 (rive gauche) et de 1996 (rive droite)
Pont X V0 (20/1/2020)	Arc	Propagation (< 2015)
St Poncy 1988	Piles	Propagation (entre 2001 and 2019)
Pirou 1981	Piles	Initiation
Boutiron 1913	Arc	Initiation
Ré 1987-1988	Pile Pb (Zone Z3)	Propagation
	Pile Ph (Zone Z3)	Propagation
	Pile Po (Zone Z3)	Propagation
Vallières 1926	Arc	Initiation (zone investiguée) ; propagation (poteaux)
Ouvrage maritime X 2014	Élément témoin	Initiation



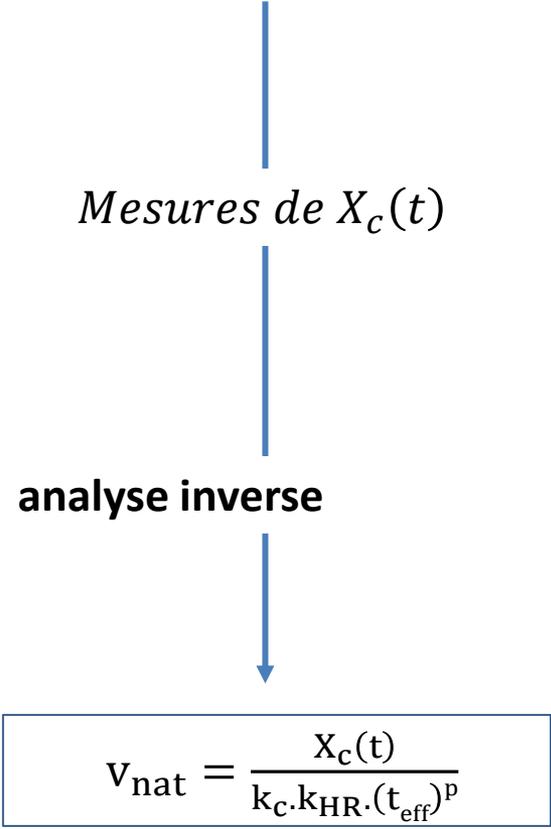
# Analyse de la Carbonatation



► **Calcul de  $v_{nat}$  à partir des mesures de  $X_c(t)$**   $X_c(t) = v_{nat} \cdot k_c \cdot k_{HR}(t_{eff})^p$

$t$  : âge des investigations  $p = 1/2$   
 Coefficient de cure :  $k_c = 1$   
 $X_c(t)$  : **mesures** de profondeur de carbonatation à  $t$

Données climatiques  $\rightarrow$  HR  $\rightarrow$   $k_{HR} = \frac{1}{\left(\frac{HR - HR_{crit}}{HR_{crit}}\right)^2 + 1}$   
 $\downarrow$   $\nearrow$   
 Nb de jours de pluie (> 10 mm) par an  $\rightarrow$  ToW = Nb / 365  
 $HR_{crit} = 50\%$   
 $\beta_w = 1 \rightarrow K_{teff} = 1 - (1 + \beta_w) \cdot ToW$   
 $\downarrow$   
 $t_{eff} = t \cdot k_{teff}$



Ouvrage	Classe exposition	Données climatiques			Paramètres de la loi de carbonatation				
		HR (%)	Nombre de jours de pluie par an (Rr 10 mm)	ToW (-)	$k_{HR}$ (-)	$k_c$ (-)	$p$	$\beta_w$ (-)	$k_{teff}$ (-)
Quai des TCD 1964-1965	XC4/XS3	85	40	0,11	0,561	1	0,5	1,5	0,726
Chateaubriand 1987-1991	XC4/XS3	85	40	0,11	0,561	1	0,5	1,5	0,726
Vachette 1984-85 corniche	XF4	70	25	0,07	0,924	1	0,5	1,5	0,829
Vachette 84-85 culée	XF4	70	25	0,07	0,924	1	0,5	1,5	0,829
St Poncy 1988	XF4	73	15	0,04	0,867	1	0,5	1,5	0,897
Pirou 1991	XF4	73	15	0,04	0,867	1	0,5	1,5	0,897
Bruche 1947 (corrodée)	XC4	79	16	0,04	0,730	1	0,5	1,5	0,890
Bruche 1947 (saine)	XC4	79	16	0,04	0,730	1	0,5	1,5	0,890
Blondel 1964 chevêtre	XC4	56	19	0,05	1,084	1	0,5	1,5	0,870
Blondel 1964 dalle	XC4	56	19	0,05	1,084	1	0,5	1,5	0,870
Vallières 1926 nervures de l'arc	XF3	72	34	0,09	0,887	1	0,5	1,5	0,767
Vallières 1926 partie massive de l'arc	XF3	72	34	0,09	0,887	1	0,5	1,5	0,767
Boutiron	XC4	73	20	0,05	0,867	1	0,5	1,5	0,863



Ouvrage	classe d'exposition	Données climatiques			Paramètres de la loi de carbonatation				
		HR (%)	Nombre de jours de pluie par an (Rr 10 mm)	ToW (-)	$k_{HR}$ (-)	$k_c$ (-)	$\rho$	$\beta_w$ (-)	$k_{teff}$ (-)
Palais d'Iena 1937	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Bourse de Bordeaux 1935-38	XC4	81	31	0,08	0,677	1	0,5	1,5	0,788
Barrage de Vezins 1929-1932 Voûte sup	XC4	80	20	0,05	0,704	1	0,5	1,5	0,863
Melun M25CV – 4 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M25 – 4 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M30CV - 4 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M50CV - 4 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M50 - 4 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M75FS - 4 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M25CV - 19 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M25 - 19 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M30CV - 19 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M50CV - 19 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M50 - 19 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890
Melun M75FS - 19 ans	XC4	76	16	0,04	0,803	1	0,5	1,5	0,890



Ouvrage	Classe d'exposition	Temps des investigations et temps effectif		Carbonatation mesurée	Analyse inverse
		t (an)	t <sub>eff</sub> (an)	Xc (t) (mm)	V <sub>nat</sub> (mm/an <sup>p</sup> )
Quai des TCD 1964-1965	XC4 / XS3	51	37	1	0,29
Chateaubriand 1987-1991	XC4 / XS3	25	18	2.6	1,09
Vachette 1984-85 corniche	XF4	34	28	17	3,47
Vachette 1984-85 culée	XF4	34	28	14	2,85
St Poncy 1988	XF4	31	28	20	4,37
Pirou 1991	XF4	28	25	4	0,92
Bruche 1947 (zone corrodée)	XC4	66	59	25	4,47
Bruche 1947 (zone saine)	XC4	70	62	30	5,21
Blondel 1964 chevetre	XC4	51	44	35	4,85
Blondel 1964 dalle	XC4	51	44	35	4,85
Vallières 1926 nervures de l'arc	XF3	92	71	36	4,83
Vallières 1926 partie massive de l'arc	XF3	92	71	45	6,04
Boutiron 1913	XC4	107	92	1	0,12

*Nom d'ouvrage en bleu : ouvrage en phase d'initiation de corrosion*

*Nom d'ouvrage en rouge : ouvrage en phase de propagation de corrosion*



# EVOLUTION PRÉDICTIVE DU FRONT DE CARBONATATION

Ouvrage	Classe d'exposition	Temps des investigations et temps effectif		Carbonatation mesurée	Analyse inverse
		t (an)	t <sub>eff</sub> (an)	Xc (t) (mm)	V <sub>nat</sub> (mm/an <sup>p</sup> )
Palais d'Iena 1937	XC4	80	71	32	4,72
Bourse de Bordeaux 1935-38 mur	XC4	80	63	50	9,30
Bordeaux Bourse 1935-38 colonnes	XC4	80	63	15	2,79
Barrage de Vezins 1929-1932 voûte sup	XC4	86	72	19	3,17
Melun M25CV – 4 ans	XC4	4	4	15	9,90
Melun M25 – 4 ans	XC4	4	4	10	6,60
Melun M30CV - 4 ans	XC4	4	4	7	4,62
Melun M50CV - 4 ans	XC4	4	4	2.5	1,65
Melun M50 - 4 ans	XC4	4	4	0.5	0,33
Melun M75FS - 4 ans	XC4	4	4	1	0,66
Melun M25CV - 19 ans	XC4	19	17	21	6,36
Melun M25 - 19 ans	XC4	19	17	16	4,85
Melun M30CV - 19 ans	XC4	19	17	10	3,03
Melun M50CV - 19 ans	XC4	19	17	5	1,51
Melun M50 - 19 ans	XC4	19	17	1	0,30
Melun M75FS - 19 ans	XC4	19	17	1	0,30

*Nom d'ouvrage en bleu : ouvrage en phase d'initiation de corrosion*

*Nom d'ouvrage en rouge : ouvrage en phase de propagation de corrosion*



- ▶ Calcul du front de carbonatation à 50 ans et 100 ans
- ▶ Calcul du temps d'initiation de la corrosion pour les enrobages théorique et réel

$X_c(t)$  : mesure de la profondeur de carbonatation



$$X_c(50a) = v_{nat} \cdot k_c \cdot k_{HR} (50 \cdot k_{teff})^p$$

$$X_c(100a) = V_{nat} \cdot k_c \cdot k_{HR} (100 \cdot k_{teff})^p$$

Calcul de la profondeur de carbonatation au temps t

$$t = \frac{1}{k_{teff}} \cdot \left( \frac{X_c(t)}{k_c \cdot k_{HR} \cdot v_{nat}} \right)^{1/p}$$



$$t_{ini} = \frac{1}{k_{teff}} \cdot \left( \frac{C_{min, dur}}{k_c \cdot k_{HR} \cdot v_{nat}} \right)^{1/p}$$

← Enrobage théorique pour durabilité à 50 ou 100 ans :  
 $C_{min, dur}$



Ouvrage	Classe d'exposition	Enrobage théorique pour 50 ans		Enrobage théorique pour 100 ans		Enrobage moyen réel (mm)	$X_c$ mesuré (mm)	Calcul		$t_{ini}$ ( $C_{min, dur}$ )	$t_{ini}$ (enrobage réel moyen) (an)		
		$C_{min, dur}$ (mm)	Classe structurale	$C_{min, dur}$ (mm)	Classe structurale			$X_c$ 50ans (mm)	$X_c$ 100ans (mm)			Pour une DUP de 50 ans (an)	Pour une DUP de 100 ans (an)
Vachette corniche	XF4	45	S4	55	S6	40	17	21	29	238	356	188	
Vachette culée	XF4	45	S4	55	S6	36	14	17	24	351	525	225	
St Poncy	XF4	45	S4	55	S6	30	20	25	36	157	234	70	
Pirou	XF4	35	S2	45	S4	30	4	5	8	> 500	> 500	> 500	
Bruche (zone corrodée)	XC4	25	S3	35	S5	41	25	22	31	66	129	178	
Bruche (zone saine)	XC4	25	S3	35	S5	41	30	25	36	49	95	131	
Blondel chevêtre	XC4	30	S4	40	S6	60	35	35	49	37	67	150	
Blondel dale	XC4	30	S4	40	S6	26	35	35	49	37	67	28	
Vallières nervures arc	XF3	30	S4	40	S6	27	36	27	38	64	114	52	
Vallières partie massive arc	XF3	30	S4	40	S6	-	45	33	47	41	73		
Boutiron	XC4	25	S3	35	S5	40	1	1	1	> 500	> 500		

Classe structurale déduite de la résistance en compression

Colonnes roses : Profondeur théorique de carbonatation à 50 et 100 ans

Colonnes vertes : Temps d'initiation pour que la carbonatation atteigne les aciers ayant un enrobage  $C_{min, dur}$

limite de validité du modèle : valeur mesurée du front de carbonatation trop faible



Ouvrage	Classe d'exposition	Enrobage théorique pour 50 ans		Enrobage théorique pour 100 ans		Enrobage moyen réel (mm)	$X_c$ mesuré (mm)	Calcul		$t_{ini}$ ( $C_{min, dur}$ )		$t_{ini}$ (enrobage réel moyen) (an)
		$C_{min, dur}$ (mm)	Classe structurale	$C_{min, dur}$ (mm)	Classe structurale			$X_c$ 50ans (mm)	$X_c$ 100ans (mm)	Pour une DUP de 50 ans (an)	Pour une DUP de 100 ans (an)	
Palais d'Iena	XC4	30	S4	40	S6	35	32	25	36	70	125	96
Bourse de Bordeaux murs	XC4	30	S4	40	S6	20	50	40	56	29	51	13
Bourse de Bordeaux colonnes	XC4	30	S4	40	S6	45	15	12	17	320	> 500	> 500
Barrage de Vezins voûte Sup	XC4	30	S4	40	S6	39	19	15	21	209	372	354
Melun M25CV-19 ans	XC4	30	S4	40	S6	30	21	34	48	39	69	39
Melun M25 – 19 ans	XC4	30	S4	40	S6	30	16	26	37	67	119	67
Melun M30CV-19 ans	XC4	30	S4	40	S6	30	10	16	23	171	304	171
Melun M50CV-19 ans	XC4	25	S3	35	S5	30	5	8	11	475	> 500	> 500
Melun M50-19 ans	XC4	20	S2	30	S4	30	1	2	2	> 500	> 500	> 500
Melun M75FS-19 ans	XC4	20	S2	30	S4	30	1	2	2	> 500	> 500	> 500

Classe structurale déduite de la résistance en compression

Colonnes roses : Profondeur théorique de carbonatation à 50 et 100 ans

Colonnes vertes : Temps d'initiation pour que la carbonatation atteigne les aciers ayant un enrobage  $C_{min, dur}$

limite de validité du modèle : valeur mesurée du front de carbonatation trop faible



Ouvrage	Classe d'exposition	âge (an)	Modélisation			Niveau de sécurité		
			$t_{ini}$ (enrobage reel)	$t_{ini}$ (DUP 50 ans)	$t_{ini}$ (DUP 100 ans)	$t_{ini}$ (enrobage réel moyen) > Age de l'ouvrage	$t_{ini}$ (DUP 50a) > 50 ans	$t_{ini}$ (DUP 100a) > 100 ans
Vachette corniche	XF4	34	188	238	356	Oui	Oui	Oui
Vachette culée	XF4	34	225	351	525	Oui	Oui	Oui
St Poncy	XF4	31	70	157	234	Oui	Oui	Oui
Pirou	XF4	28	> 500	> 500	> 500	Oui	Oui	Oui
Bruche (zone corrodée)	XC4	66	178	66	129	Oui	Oui	Oui
Bruche (zone saine)	XC4	70	131	49	95	Oui	Non	Non
Blondel chevêtre	XC4	51	150	37	67	Oui	Non	Non
Blondel dalle	XC4	51	28	37	67	Non <sup>(2)</sup>	Non <sup>(1)</sup>	Non <sup>(1)</sup>
Vallières nervures de l'arc	XF3	92	52	64	114	Non <sup>(2)</sup>	Oui	Oui
Vallières parties massives de l'arc	XF3	92	-	41	73	-	Non	Non
Boutiron	XC4	107	-	> 500	> 500	-	Oui	Oui
Palais d'Iéna	XC4	80	96	70	125	Oui	Oui	Oui
Bourse de Bordeaux mur	XC4	80	13	29	51	No	Non	Non
Boursed de Bordeaux colonnes	XC4	80	720	320	569	Oui	Oui	Oui
Barrage de Vezins Voûte Sup.	XC4	86	354	209	372	Oui	Oui	Oui
Melun M25CV-19 ans	XC4	19	39	39	69	Oui	Non	Non
Melun M25-19 ans	XC4	19	67	67	119	Oui	Oui	Oui
Melun M30CV-19 ans	XC4	19	171	171	304	Oui	Oui	Oui
Melun M50CV-19 ans	XC4	19	684	475	931	Oui	Oui	Oui
Melun M50-19 ans	XC4	19	> 500	> 500	> 500	Oui	Oui	Oui
Melun M75FS-19 ans	XC4	19	> 500	> 500	> 500	Oui	Oui	Oui

limite de validité de la modélisation : valeur mesurée du front de carbonatation trop faible

(1) : la corrosion n'est pas suffisamment avancée pour générer des désordres visibles au niveau de l'ouvrage

(2) : temps d'initiation trop lent par rapport à la DUP de l'ouvrage.

« Sécuritaire », en considérant seulement  $t_{ini}$

Règles du fascicule 65 (100 ans) :

XC4 : porosité = 14,5% ;  $k_{gaz} = 200 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}$

XD3 (XF4) : porosité = 13,0% ;  $k_{gaz} = 200 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{s}$

Valeurs proches du fascicule 65

Quasi-sécuritaire

Valeurs dépassant le fascicule. 65

Non sécuritaire

## ► Calcul du rapport entre vitesses de carbonatation naturelle et accélérée

Ouvrage	$v_{nat}$ (mm/an <sup>p</sup> ) Calculée	$v_{acc}$ (mm/j <sup>p</sup> ) Mesurée	Rapport $v_{nat} / v_{acc}$
Bruche (zone corrodée)	4,47	1,44	3,1
Blondel chevêtre	4,85	1,55	3,1
Vachette culée	2,85	1,19	2,4
St Poncy	4,37	2,13	2,1
		moyenne	<b>2,7</b>

Valeur cohérente avec celle obtenue lors de l'étude des 42 bétons de labo : **3,0**

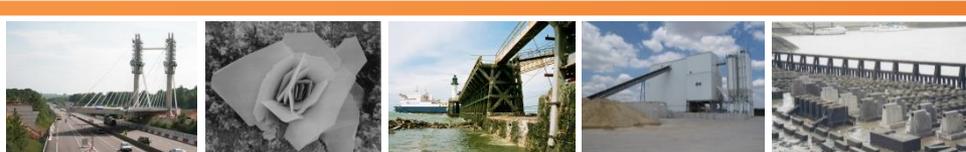
## ► Examen des ouvrages en phase de propagation de la corrosion

Ouvrage	âge (ans)	Projet de DUP de 50 ans		Projet de DUP de 100 ans		Cause de la corrosion
		Porosité (%)	$k_{gaz}$ ( $10^{-18} m^2$ )	Porosité (%)	$k_{gaz}$ ( $10^{-18} m^2$ )	
Vachette corniche	34	< 14,0	< 150			Cycles gel / dégel avec sels
Vachette culée	34	< 13,5	< 250			
St Poncy	31	< 16,7	< 646			
Bruche (zone corrodée)	66	< 14,2	< 300			Enrobage insuffisant
Vallières nervures de l'arc	92			< 20,1	< 700	Forte valeur de porosité
Palais d'Iéna	80	< 18,7	< 805	< 18,5	< 805	Enrobage insuffisant
Barrage de Vezins	86	< 21,2		< 21,2		<b>Forte valeur de porosité</b>



► Valeurs des Indicateurs de Durabilité en lien avec les anciens ouvrages sains

Structure	Age (an)	Projet de DUP de 50 ans		Projet de DUP de 100 ans	
		Porosité (%)	$k_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )	Porosité (%)	$k_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )
Bruche (zone saine)	70	> 14,7		> 14,7	
Blondel chevêtre	51	> 17,7	> 600		
Blondel dalle	51	> 13,2	> 200		
Boutiron	107	> 16,4	> 224	> 16,4	> 224
Bourse de Bordeaux	80	> 13,0	> 607	> 13,0	> 607



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

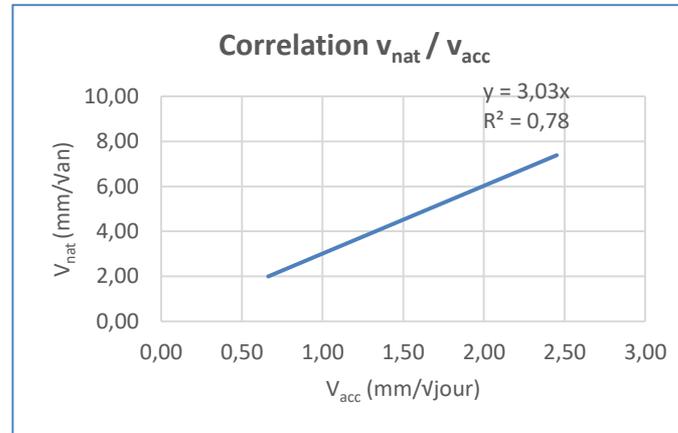
avec  $t_{eff} = t \cdot k_{teff}$

$$p = \frac{\ln\left(\frac{X_c(t)}{v_{nat} \cdot k_c \cdot k_{HR}}\right)}{\ln t_{eff}}$$

	Vitesse de carbonatation		Age (an)	Xc(t) (mm)	paramètres			Expo-	Calcul avec
	V <sub>carbo.acc</sub> (mm / jour <sup>0.5</sup> )	V <sub>nat</sub> (mm/an <sup>0.5</sup> )			k <sub>RH</sub>	k <sub>c</sub>	k <sub>teff</sub>	sant p	p=0.5
Bruche (corrodée)	1,44	4,42	66	25	0,73	1	0,89	0,50	25
Bruche (saine)	1,44	4,42	66	30	0,73	1	0,89	0,55	25
Blondel	1,55	4,75	47	35	1,08	1	0,87	0,52	33
Vachette chevêtre	1,19	3,65	34	17	0,92	1	0,83	0,48	18
Vachette culée	1,19	3,65	34	14	0,92	1	0,83	0,43	18
St Poncy	2,13	6,53	31	20	0,87	1	0,90	0,38	30

$$X_c(t) = V_{nat} \cdot k_c \cdot k_{HR} (t_{eff})^p$$

Valeur moyenne = 0,48



$v_{carbo.acc}$  : mesurée

$v_{nat}$  : déduite de  $v_{carbo.acc}$   
 à l'aide de la loi expérimentale



Si :  $X_c(t) = v_{nat} \cdot k_c \cdot k_{HR} \cdot (t_{eff})^p$

si  $v_{nat} = \text{constante}$

$$p_1 = \frac{\ln\left(\frac{X_c(t_1)}{X_c(t_2)}\right)}{\ln\left(\frac{t_1}{t_2}\right)}$$

BHP2000 Site de Melun	Mesures de Carbonatation				Loi de puissance	Paramètre de cure
	âge (an)	Xc(t) (mm)	âge (an)	Xc(t) (mm)	p <sub>1</sub>	k' <sub>c</sub>
Melun M25CV	4	15	19	21	0,22	9,9
Melun M25	4	10	19	16	0,30	4,9
Melun M30CV	4	7	19	10	0,23	4,5
Melun M50CV	4	2.5	19	5	0,44	0,4
Melun M50	4	0.5	19	1	0,44	0,1
Melun M75FS	4	1	19	1	0,00	
				<b>Moy.</b>	<b>0,33</b>	

Si :  $X_c(t) = k'_c + v_{nat} \cdot k_{HR} \cdot (t_{eff})^p$



k'<sub>c</sub>: facteur d'impact de la cure initiale

si  $v_{nat} = \text{constante}$   
 et  $p = 0,50$

$$k'_c = \frac{X_c(t_1) - X_c(t_2) \cdot \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^p}{1 - \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^p}$$



## ► Principaux résultats sur la carbonatation

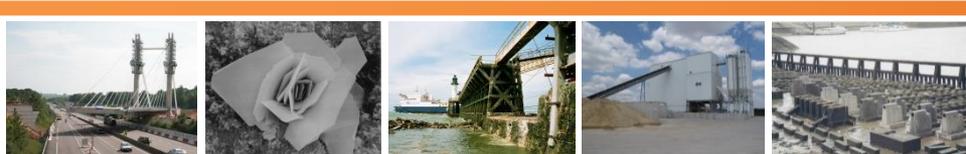
- Valeurs de  $k_{\text{gaz}}$  et porosité suffisantes (mais non nécessaires) pour éviter la corrosion

Projet de DUP de 50 ans				Projet de DUP de 100 ans			
Porosité (%)	$k_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )	$v_{\text{nat}}$ (mm/an <sup>p</sup> )	$v_{\text{acc}}$ (mm/jour <sup>p</sup> )	Porosité (%)	$k_{\text{gaz}}$ ( $10^{-18} \text{ m}^2$ )	$v_{\text{nat}}$ (mm/an <sup>p</sup> )	$v_{\text{acc}}$ (mm/jour <sup>p</sup> )
13,0 – 17,7	200 - 607	0,12 – 9,30	0,04 – 3,08	13,0 – 16,4	224 - 607	0,12 – 9,30	0,04 – 3,08

- Utilité des mesures de carbonatation accélérée
- Mesures de  $k_{\text{gaz}}$  difficiles à interpréter sur les anciens ouvrages
- Rapport  $v_{\text{nat}} / v_{\text{acc}}$  : valeurs entre 2,1 and 3,1 cohérentes avec les données obtenues avec les 42 bétons de laboratoire
  - Valeur de 3 est sécuritaire
  - Permet la prédiction par le calcul du front de carbonatation
- $k_c$  en tant que terme multiplicatif a peu d'intérêt : il pourrait être en coefficient additif
- Données expérimentales en accord avec une puissance de 0,5 pour la loi exponentielle

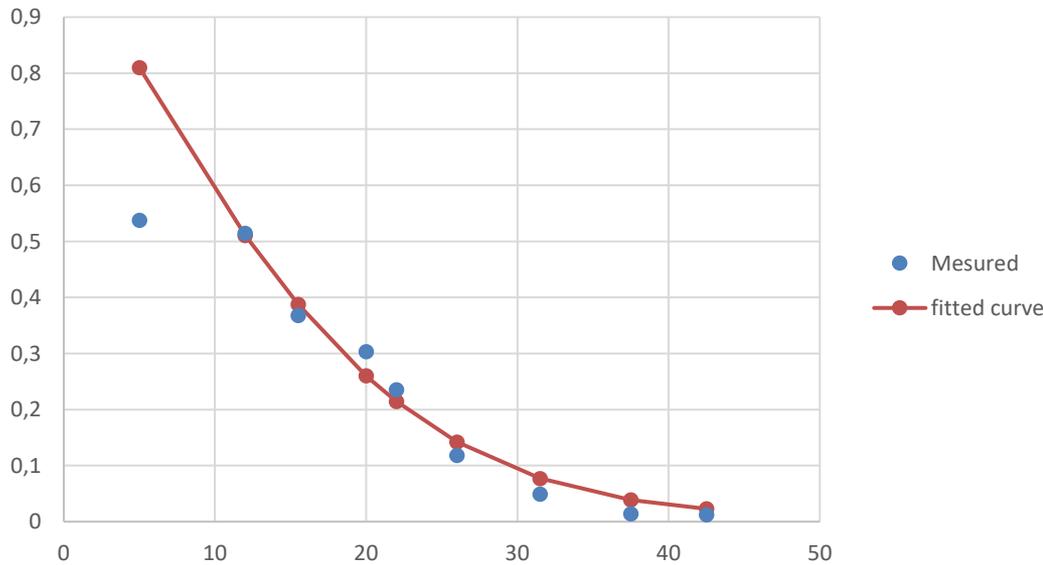


# Interprétation des Chlorures

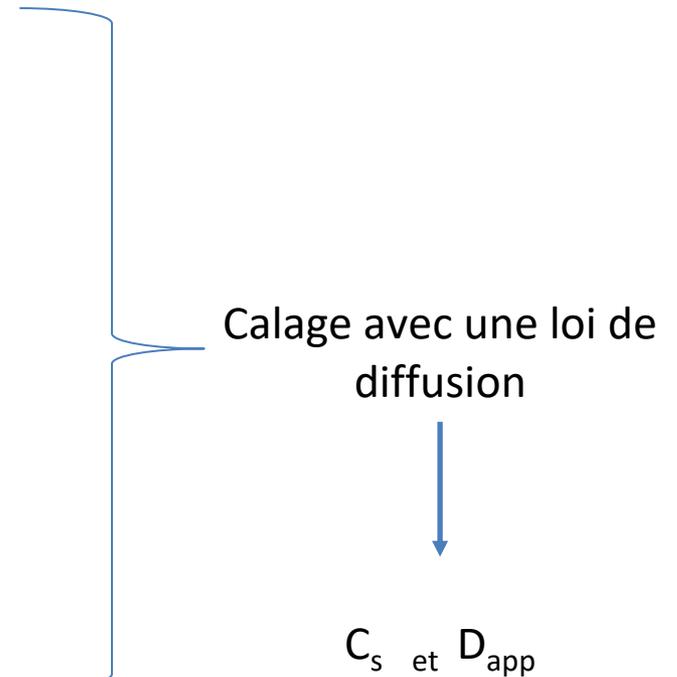


►  $D_{app}$  : Coefficient apparent de diffusion obtenu à partir de la méthode des profils de chlorures

Profils de Chlorures Libres / Totaux



BHP2000 M75FS – Site de La Rochelle (Cl- totaux )



$C_s$  : concentration de chlorures à la surface



Initiation Propagation	Age (an)	Classe d'exposition	Liant	Chlorures	Cs (% béton)	Cs (% cim)	$D_{app}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	$D_{rcm, t0}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	$D_{rcm, t}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )
BHP2000 Rochelle	19	XS3, marnage	CV	Mode Op LCPC	0,50		4,8	30	
					0,31		4,2	9,5	
					0,44		1,1	1,7	
					0,51		2,0	8,7	
					0,60		0,9	1,8	
					0,56		1,4	5,6	
					FS		0,4	0,8	
					FS		1,20	0,3	
Ré	30	XS3, Marnage (Zone Z3)	CEM II/A (10 % laitier)	Libres	0,80		0,15	0,04	
					0,41		0,23		8,5
					0,25		0,29		
					0,23		0,37		
					0,47		0,54		8,7
					0,46		0,23		
					0,24		0,31		15
					0,36		0,41		
0,26		0,27							
Pirou	28	XF4	CEM I	Libres	0,18		0,63		
						1,30	0,17		9,4
						1,40	0,18		
Saint Poncy	31	XF4	CEM I	Libres		1,10	0,095		
						5,80	0,41		41
						4,10	0,25		
Chateau- briand	25	XS3, marnage	CEM I PM	Totaux	0,14		1,8		29
		XS3, éclaboussures			0,053		1,4		
		XS3, embruns					-		
	22	XS3, marnage		Libres	0,07		1,1		-

# DÉTERMINATION DE $D_{app}$ ET COMPARAISON AVEC $D_{rcm}$

Initiation Propagation	Age (an)	Classe d'exposi- tion	liant	Chlorures	$C_s$ (% béton)	$C_s$ (% cim)	$D_{app}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	$D_{rcm, t0}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )	$D_{rcm, t}$ ( $10^{-12}m^2/s$ )
Pont X	60	XS3		Libres	0,70		0,19		10
				Totaux	1,20		0,13		
Vachette	34	XF4	CEM I	Libres	0,05		0,2		28
					0,05		-		
					0,03		0,3		
							0,8		
Vallières	92	XF3	CEM I	Libres			-		97
					0,21		0,44		
					0,18		0,21		
					0,32		0,25		
Quai des TCD	51	XS3	CEM I	Totaux	0,26		0,19		2,3
					0,19		0,21		
Vasco de Gama	17.75	XS3	CEM I + CV (18%)	Libres		8,00	0,13	3,4	0,16
							6,00		
				Totaux		9,30	0,23		
						7,50	0,17		
			CEM IV (25 % CV)	Libres		4,20	0,15	0,52	0,3
					Totaux		5,20		
Rion-Antirion	12.5	XS3	CEM III/A PM ES	Libres	1,10		0,42	0,86	0,37
				Totaux	1,20		0,46		
	9	XS2		Libres	0,28		0,59	0,86	0,4
				Totaux	0,36		0,59		
	3.75	XS3		Libres	1,40		0,12	0,86	0,49
					1,20		0,10		
				Totaux	1,25		0,28	0,86	
					1,20		0,11		

## ► Estimation des facteurs de vieillissement apparents

$$D_{app,t} = k_t * k_e * (D_{rcm,to}) * [t_0 / (\text{age} * 365)]^a \quad \longrightarrow \quad a = \ln(D_{app,t} / D_{rcm,to}) / \ln(t_0 / (\text{age} * 365))$$

avec  $k_e = 1$  et  $k_t = 1$

$t_0 = \text{âge de la mesure initiale de } D_{rcm}$

Ouvrage	Classe d'exposition	Liant	Age (an)	$t_0$ (jours)	a tabulé	a calculé
Vasco de Gama	XS3 (pile)	CEM I + CV (18%)	17,75	90	0,60	0,78
	XS3 (pile centrale)	CEM IV (25 % CV)				0,66
Rion Antirion	XS3 (mur d'essai)	CEM III/A PM ES	12,5	75	0,45	0,17
	XS2 (pile M2)		9			0,15
	XS3 (piles M2 M3)		3,75		0,45	0,10
						0,10
					0,45	0,71
						0,71
BHP 2000 La Rochelle	XS3	M25 CV	19	28	0,60	0,15
		M50				0,27
		M50 CV			0,60	0,28
		M75			0,30	0,25
		M75 FS			0,40	0,22
		M100 FS				0,06
		M120 FS				-0,24

Cases vertes : béton avec cendres volantes

Cases bleues : béton avec laitier

Cases violettes : béton avec fumée de silice

Cases orange : bétons avec CEM I

	a		
	mini	maxi	tabulé
CEM I	0,25	0,27	0,30



## ► Principaux résultats avec les chlorures

- Valeurs de  $D_{rcm}$  liées aux ouvrages sains

	a		
	mini	maxi	tabulate
CEM I	0,25	0,27	0,30

	Age (an)	Classe d'exposition	liant	$D_{RCM, t0}$ ( $10^{-12} m^2/s$ )	$D_{RCM, t}$ ( $10^{-12} m^2/s$ )
Vasco de Gama	17,75	XS3	CEM I + CV (18%)	3,4	0,16
			CEM IV (25 % CV)	0,52	0,3
Rion-Antirion	12,5	XS2 - XS3	CEM III/A PM ES	0,86	0,37 à 0,49
Quai des TCD	51	XS3	CEM I		<b>2,3</b>
Chateaubriand	25	XS3	CEM I PM		29
Vachette	34	XF4 / XD3	CEM I		28
Ré	30	XS3, marnage	CEM II/A		<b>8,6</b>
Saint Poncy	31	XF4 / XD3	CEM I		41
Pirou	28	XF4 / XD3	CEM I		9,4

• Ouvrages trop jeunes pour conclure...

• La valeur de  **$2.3 \cdot 10^{-12} (m^2/s)$**  est cohérente pour un projet de DUP de 50 ans

• Les valeurs  **$> 8.6 \cdot 10^{-12} (m^2/s)$**  ne sont pas cohérentes avec un projet de DUP de 50 ans

- Valeurs de  $D_{rcm}$  liées aux ouvrages endommagés

	Age (an)	Classe d'exposition	liant	$D_{rcm, t}$ ( $10^{-12} m^2/s$ )
Pont de X	60	XS3	-----	10

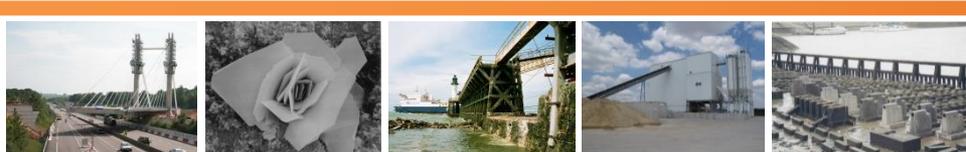


## ► Importance d'avoir un REX sur d'anciennes structures existantes...

- Forte dispersion des mesures des indicateurs de durabilité sur les ouvrages existants (maxi pour  $k_{gaz}$ ), ce qui justifie une approche statistique pour fixer des seuils
- Dispersion encore plus forte des témoins de durée de vie (le pire est pour l'enrobage des aciers ; variable en fonction de la position dans l'ouvrage...)
  - ➔ **Difficulté de décider si un ouvrage est globalement en phase d'initiation ou en phase de propagation de la corrosion**

## ► Corrosion par carbonatation

- Confirmation de l'existence d'une relation entre vitesse de carbonatation naturelle et vitesse de carbonatation accélérée (rapport  $v_{nat} / v_{acc}$  entre 2,1 et 3,1) ce qui justifie l'intérêt de l'essai de carbonatation accélérée dans une approche performantielle
- Confirmation de la validité de la loi en racine carrée du temps et de l'importance du choix correct des coefficients de cure et d'hygrométrie dans le modèle issu de l'ANR MODEVIE
- Les valeurs des indicateurs de durabilité obtenues sur les ouvrages sains peuvent être considérées comme suffisantes mais non nécessaires pour obtenir une absence de corrosion, pour des projets de durée de vie de 50 ou 100 ans



## ► Corrosion par les chlorures

- Valeur de  $D_{rcm} = 2,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  cohérente avec un projet de DUP de 50 ans
- Valeurs de  $D_{rcm} > 8.6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  incompatibles avec un projet de DUP de 50 ans pour une classe d'exposition XS3
- Fortes dispersions du facteur de vieillissement avec des bétons incorporant des additions
- Facteurs de vieillissement obtenus avec les CEM I cohérents avec la valeur de 0,3 du bulletin *fib* n°34

## ► Attaque due au gel

- En l'absence de modèles de comportement d'un béton soumis à des conditions de gel-dégel, impossibilité de conduire des simulations de la vie des ouvrages à partir de données collectées et de valider les seuils des indicateurs de durabilité
- Sur la base des ouvrages construits dans les années 1980 et situés dans une zone de gel sévère, le principal résultat est qu'il convient de respecter les seuils actuels des indicateurs de durabilité fixés dans les recommandations françaises de l'Université Gustave Eiffel (ex-IFSTTAR) pour la formulation des bétons soumis au gel-dégel avec ou sans sels de déverglaçage



*Merci pour votre attention*

