

VIADUC DE LA GRANDE CHALOUPE : APPROCHE DE LA DURABILITÉ DES BÉTONS

**Christophe CARDE (LERM/SETEC), Sandrine CHANUT,
Philippe LE COQ (EIFFAGE), Thibault CESTERO (RAZEL-BEC),
Christophe OUTTERYCK (EGIS)**

Viaduc de la Grande Chaloupe : approche de la durabilité des bétons

Christophe CARDE : LERM-SETEC,

Sandrine CHANUT & Philippe LECOQ : EIFFAGE INFRASTRUCTURES Génie Civil

Thibaut CESTERO : RAZEL-BEC

Christophe OUTTERYCK : EGIS

Sommaire

Introduction - Contexte - Durabilité

- 1 Projet de la Nouvelle Route du Littoral (NRL) - Viaduc de la Grande Chaloupe
- 2 L'environnement, les risques associés et les spécifications initiales du béton
- 3 La démarche durabilité adoptée
- 4 Le programme de suivi de la durabilité des bétons de l'ouvrage

Conclusions - Perspectives

Approche prescriptive

Des paramètres liés à la formulation

Des propriétés mécaniques

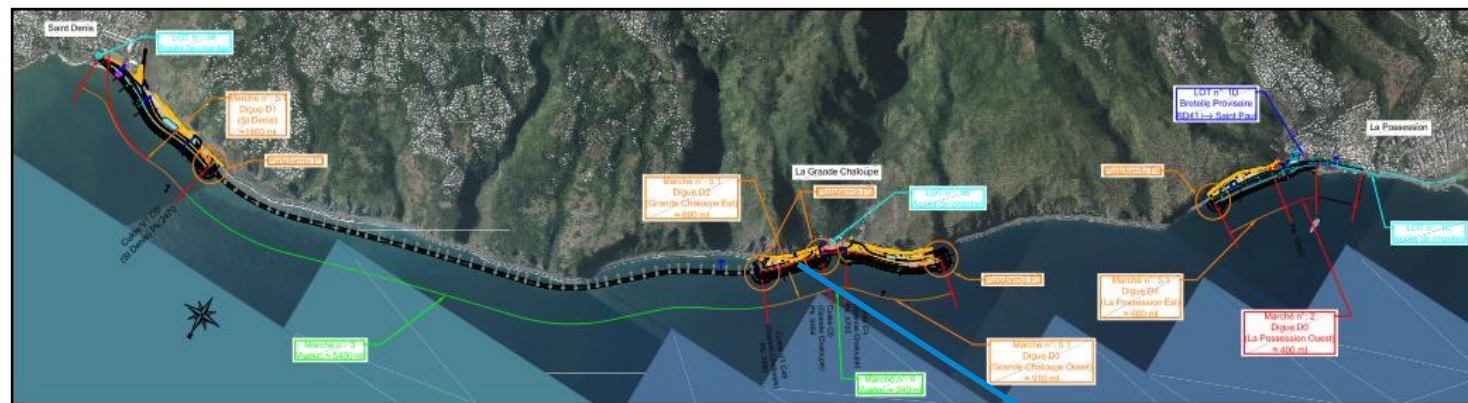
Durée de vie de 100 ans
Sollicitations particulières

Approche performantielle « absolue »

Des indicateurs de durabilité

Des seuils associés

1. Projet de la Nouvelle Route du Littoral – Viaduc de la Grande Chaloupe



MAÎTRE D'OUVRAGE : La Région Réunion

MAÎTRE D'ŒUVRE : EGIS

CHIFFRES SIGNIFICATIFS :

- 6 700 m de digues
- 5 400 m de Viaduc en mer
- Viaduc de la Grande Chaloupe de 242 m (MT4)



MT4 VIADUC DE LA GRANDE CHALOUPE

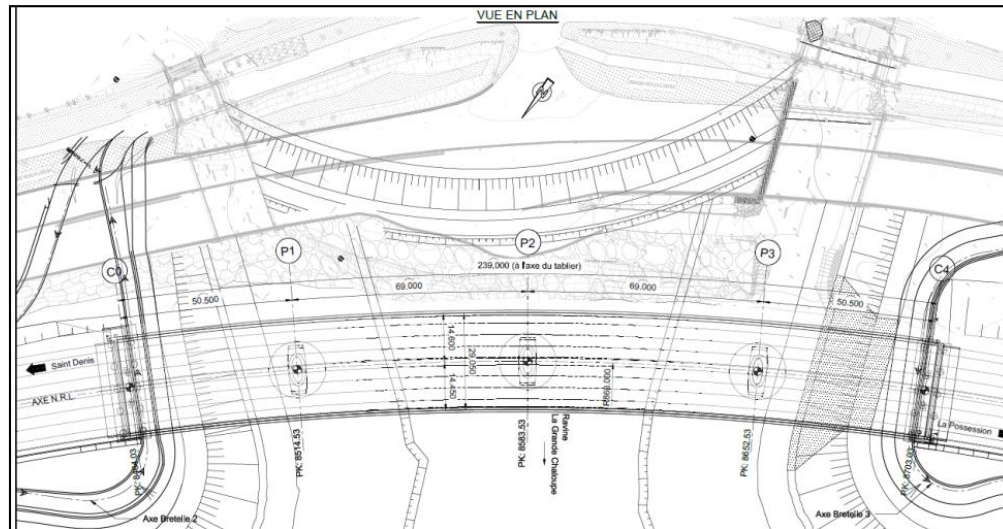


1. Viaduc de la Grande Chaloupe

Groupement d'entreprises :

- Eiffage Génie Civil
- Razel Bec
- Saipem
- NGE Contracting

Architecte : cabinet Lavigne et Chéron



- Viaduc courbe de longueur 242 m et de largeur de 29 m
- Ouvrage à 4 travées avec 2 culées fondées sur pieux et 3 piles sur fondations superficielles
- Hauteur des piles : de 16,20 m à 17,08 m
- Tablier mono-caisson à 4 âmes en béton précontraint construit par encorbellements successifs avec un équipage mobile

2. L'environnement, les risques associés et les spécifications initiales du béton

- **Climat :**

- Chaud (température moyenne de 25°C)
- Humide
- Fortes intempéries



*Image de synthèse
Architectes Lavigne et Chéron*

- **Situation géographique :**

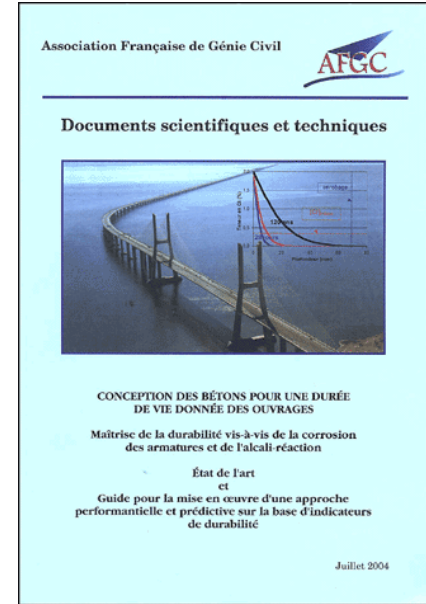
- Projet NRL en ambiance marine
- Zones « béton » totalement immergées
- Zones « béton » de marnage, soumises à des embruns

- **Pour les bétons, exigences identiques sur l'ensemble du projet**

2. L'environnement, les risques associés et les spécifications initiales du béton

- En complément d'une définition prescriptive des bétons :

- Indicateurs et seuils du guide AFGC 2004 « Conception pour une durée de vie donnée des ouvrages »,
- Avec un niveau d'exigence 4 (« Grands ouvrages - durée de vie de 100 à 120 ans »),
- Environnements 5.2 : exposition aux sels marins $\{Cl^{-}\}$ forte
 6 : immersion dans l'eau contenant des Cl^{-}
 7 : zone de marnage



P_{eau} : porosité accessible à l'eau en %.
 D_{app} : coefficient apparent de diffusion des ions chlorures en $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$
 K_{gaz} : perméabilité au gaz en 10^{-18} m^2 .
 K_{liq} : perméabilité à l'eau en 10^{-18} m^2 .

} à 90 jours

Parties d'ouvrages	Classes d'exposition	Classe de résistance minimale	D _{max} (mm)	Teneur minimale en liant équivalent (kg/m ³)	Ciment (compléments)	E _{eff} /Leq	Caractéristiques complémentaires	Indicateurs de durabilité 90 jours (*)
Pieux	XC1, XS2, XA2, XH3	C35/45	20	350	PM / ES	AP	LCH	P _{eau} < 12 D _{app} < 5
Semelles des piles	XC1, XS2, XA2, XH3	C35/45	20	350	PM / ES	AP	LCH	P _{eau} < 12 D _{app} < 5
Piles	XC4, XS3, XA2, XH3	C35/45	20	350	PM / ES	AP	LCH EQP	P _{eau} < 10 D _{app} < 2
Culées	XC4, XS3, XH2	C35/45	20	350	PM / ES	AP	LCH EQP	P _{eau} < 10 D _{app} < 2 K _{gaz} < 100 K _{liq} < 0,05
Voussoirs du tablier	XC4, XS3, XH2	C45/55	20	350	CP, PM	AP	LCH EQP LRE	P _{eau} < 10 D _{app} < 2 K _{gaz} < 100 K _{liq} < 0,05
Entretoises coulées en place	XC3, XS1, XH1	C40/50	20	330	CP, PM	AP	LCH	P _{eau} < 11 D _{app} < 3 K _{gaz} < 100 K _{liq} < 0,05
Superstructures	XC4, XS3, XH2	C35/45	20	350	PM	AP	EQP	P _{eau} < 11 D _{app} < 3 K _{liq} < 0,05 K _{gaz} < 100

Tableau : extrait du CCTP (VGC)

2. Les spécifications initiales complémentaires du béton

- **Catégorie d'ouvrage : III**
- **Prévention contre l'Alcali-Réaction (AR) :**
Niveau de prévention C (guide LCPC)
- **Prévention contre la Réaction Sulfatique Interne RSI) :**
Niveaux de prévention As, Cs et Ds (guide LCPC)



*Image de synthèse
Architectes Lavigne et Chéron*

3. La démarche durabilité adoptée – études et essais effectués en amont

- Formules testées par le fournisseur de béton (TERALTA Groupe CRH) pour répondre aux exigences du marché et de mise en œuvre)
- Ciments
- Additions
- $E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$
- Consistance
- Durée Pratique d'Utilisation
- Rc jeune âge, Rc 28 jours
- Mesures d'indicateurs de durabilité (entre 28 et 365 jours)





3. La démarche durabilité adoptée – la modélisation

- Prestations réalisées par le laboratoire LERM-SETEC
- **Objectif** : vérifier la durée de vie de l'ouvrage
- **Deux bétons concernés** : formule des piles et formule du tablier
- Modèle de prévision de pénétration des chlorures développé par le LERM (Vasco de Gama, Rion Antirion...)
- Spécificités du modèle :
 - prise en compte des interactions chlorures/pâte de ciment
 - possibilité de faire varier le coefficient de diffusion et les propriétés physico - chimiques dans le temps et dans l'espace.

3. La démarche durabilité adoptée – la modélisation

- **Spécificités du contexte du Viaduc de la Grande Chaloupe, 2 correctifs sont intégrés :**
 - Pour tenir compte des effets de la température ambiante plus élevée sur l'île de la Réunion,

$$D_{app}(t, T) = D_{app}(t, T_{réf}) \cdot \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{réf}} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

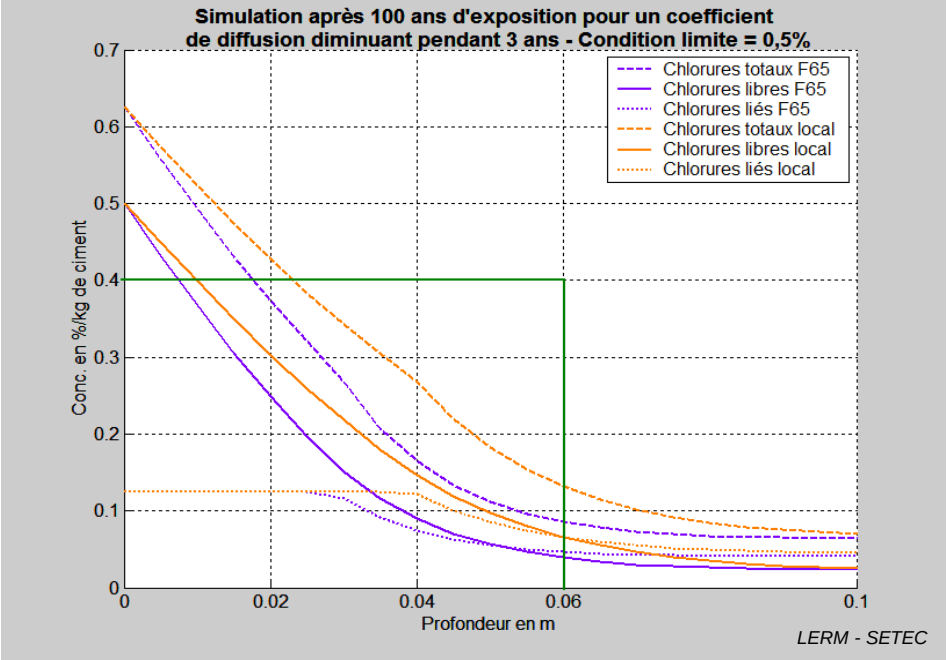
- Pour prendre en compte la porosité (ϕ) plus élevée des bétons confectionnés avec les granulats locaux

$$D_{app} = \frac{\Phi \cdot D_{app}(\text{migration})}{\left(\Phi + \rho \cdot \frac{\partial m_b}{\partial C_t} \right)}$$

3. La démarche durabilité adoptée – les simulations

Comparaison entre les conditions standards du fascicule 65 (ϕ = 13 % et T = 20 °C) et les conditions locales du VGC (ϕ = 20 % et T = 25 °C).

Simulations numériques réalisées pour le béton du tablier et données de sortie du modèle

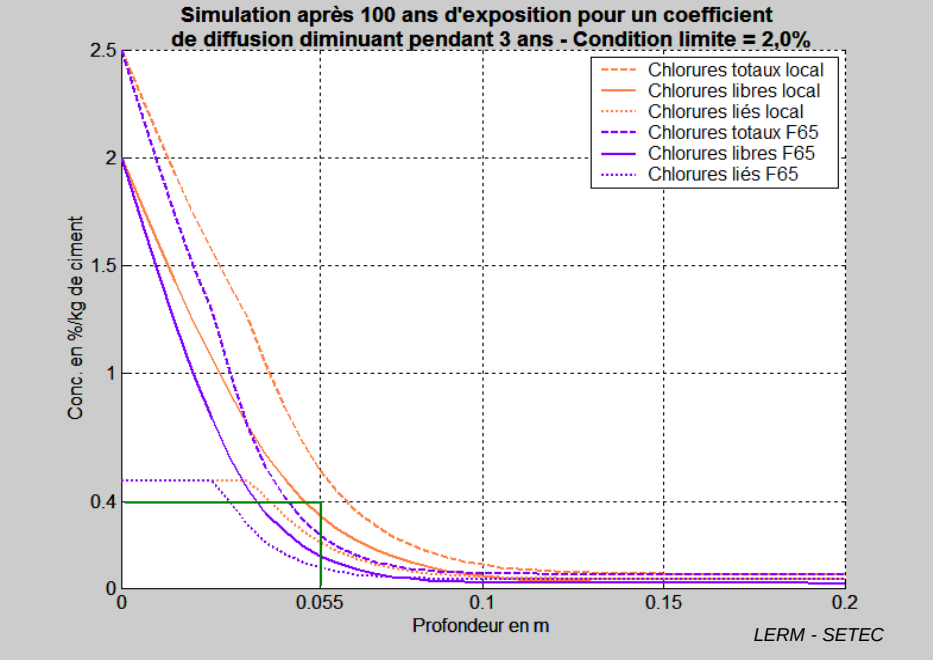


	F65	La Réunion
Enrobage	60,0 mm	
Profondeur où Cl ⁻ libres = 0,4 % à 100 ans	7,5 mm	10,0 mm
Protection résiduelle à 100 ans	52,5 mm	50,0 mm

3. La démarche durabilité adoptée – les simulations

Comparaison entre les conditions standards du fascicule 65 (ϕ = 13 % et T = 20 °C) et les conditions locales du VGC (ϕ = 20 % et T = 25 °C).

Simulations numériques réalisées pour le béton des piles et données de sortie du modèle



	F65	La Réunion
Enrobage	55,0 mm	
Profondeur où Cl ⁻ libres = 0,4 % à 100 ans	38,0 mm	51,0 mm
Protection résiduelle à 100 ans	17,0 mm	4,0 mm

3. La démarche durabilité adoptée – constituants

Ciments locaux :

- le CEM III/A 42.5 N CE PM ES CP1 NF, pour les parties massives (pieux, semelles piles et culées).
- le CEM II/A-P 42.5 N PM CP2 NF qui permet une résistance au jeune âge plus adaptée aux cycles de réalisation du tablier.

Granulats locaux qualifiés NR :

- Sable (SCL) 0/4 mm,
- Gravillon (SCL) 4/10 mm,
- Gravillon (SCL) 10/20 mm.
- + éventuellement un sable correcteur roulé/lavé (RL) 0/1 mm.

Addition :

- Fumée de silice pour les formules des piles et du tablier

3. La démarche durabilité adoptée – formules

Partie d'Ouvrage	Désignation formule
Formule MT4A Pieux et semelles	BPS C35/45 CEM III/A 42,5 N CE PM ES CP1 NF D20 220 mm (+/-20) XC1/XS2/XA2 CI 0,65 400 kg/m ³ de CEM III, $E_{eff}/C = 0,39$
Formule MT4C Piles et culées	BPS C35/45 CEM III/A 42,5 N CE PM ES CP1 NF D20 170 mm (+/-20) XC4/XS3/XA2 CI 0,65 370 kg/m ³ de CEM III et 30 kg/m ³ de fumée de silice, $E_{eff}/C = 0,39$
Formule MT4D Tablier et superstructures	BPS C40/50 CEM II/A-P 42,5 N CE PM CP2 NF D20 170 mm (+/-20) XC4/XS3 CI 0,2 360 kg/m ³ de CEM II et 40 kg/m ³ de fumée de silice, $E_{eff}/C = 0,42$

Tableau : formules concernées par l'approche performantielle absolue

3. La démarche durabilité adoptée – indicateurs de durabilité et seuils

Indicateurs de durabilité 90 jours (*)	Classe d'exposition XS2 (formule MT4A)			Classe d'exposition XS3 (formules MT4C et MT4D)		
	Appel d'offres	Fascicule 65 Oct 2014	Proposition	Appel d'offres	Fascicule 65 Oct 2014	Proposition
P_{eau}	12	14	< 20	10	13	< 20 puis 18
D_{app}	5	7	< 5	2	3.5	< 3.5
K_{gaz}	-	-	-	100	200	< 200
K_{liq}	-	-	-	0.05	Non retenu	Non retenu

Tableau : indicateurs de durabilité sélectionnés

- Essai RCPT : réalisé en complément de l'essai de porosité accessible à l'eau à 90 jours (< 2000 C pour XS2 et < 1000 C pour XS3).
- Résistivité : complète la caractérisation du béton dans le cas des épreuves de contrôle à 28 jours.

3. La démarche durabilité adoptée – AR & RSI

- **Prévention contre l'Alcali-Réaction (AR) :**
Niveau de prévention C (guide LCPC)

Granulats locaux qualifiés non réactifs vis-à-vis de l'Alcali Réaction

- **Prévention contre la Réaction Sulfatique Interne (RSI) :**
Niveaux de prévention As, Cs et Ds (guide LCPC)

Nature des liants (relaxation possible)

Formulations validées par des laboratoires

Instrumentation et suivis thermiques en convenance et en production

Limitation de la température du béton à l'état frais

Bétonnage de nuit pour les parties les plus massives



4. Le programme de suivi de durabilité des bétons de l'ouvrage

Epreuves de contrôle (durabilité)

Campagne :

- Porosité accessible à l'eau à 28 jours
- Essai de résistivité à 28 jours (1^{ère} tendance)
- Perméabilité au gaz à 90 jours,
- Porosité accessible à l'eau à 90 jours,
- Coefficient apparent de diffusion des ions chlorures à 90 jours
- Mesure RCPT à 90 jours
- Eprouvettes complémentaires



Appareil Cembureau : K_{gaz}

Partie d'ouvrage	Campagne d'essais de durabilité
Pile	• 1 par pile
Culée	• 1 par culée
Voussoirs coulés en place	• 1 fois pour les VSP (Voussoir Sur Pile)
	• 1 fois pour les VSC (Voussoir Sur Culée)
	• 2 fois pour les fléaux
Ames préfabriquées (voussoirs)	• 1 fois tous les 15 jours

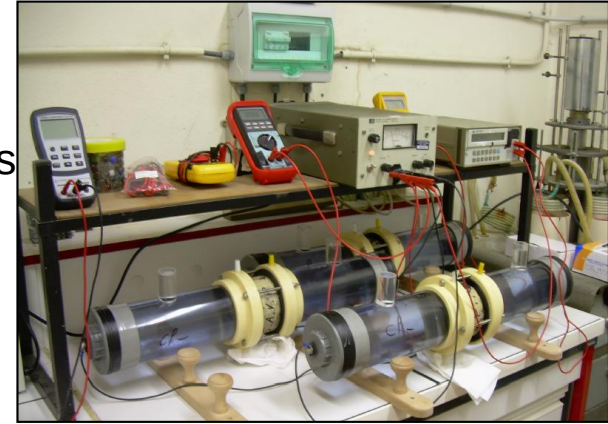
Tableau : extrait plan de contrôle durabilité

4. Le programme de suivi de durabilité des bétons de l'ouvrage

Contrôle extérieur et Suivi de l'ouvrage

Contrôle extérieur (durabilité) :

- Confection des éprouvettes nécessaires par le chantier sur demande du Maître d'Oeuvre
- Laboratoire local en charge de la réalisation des essais,
- Perméabilité au gaz à 90 jours,
- Porosité accessible à l'eau à 90 jours
- Coefficient apparent de diffusion des ions chlorures à 90 jours



Suivi :

Pendant la construction, réalisation de blocs témoins (1 m x 1 m x 0,3 m) ferrailés
un bloc sous le tablier au niveau d'une tête de pile pour des raisons d'accessibilité,
un bloc dans la zone de marnage des piles
un bloc au niveau de chaque semelle de culée.

D_{app}

4. Le programme de suivi de durabilité des bétons de l'ouvrage

Contrôle extérieur et Suivi de l'ouvrage

Une mesure des grandeurs suivantes sera réalisée par le Maître d'OEuvre sur les blocs témoins et sur certains éléments de l'ouvrage (prélèvement par carottage) :

1. l'enrobage des armatures,
2. la profondeur de carbonatation,
3. la détermination de la concentration en ions chlorure,
4. la porosité du béton sur carottes,
5. la détermination du pH du béton.

Opérations préalables à la réception : point zéro des mesures puis lors de chaque visite décennale.

Conclusions - Perspectives

- Aspects « Fabrication du béton » (malaxage, transport,...) et « Exécution » (mise en œuvre, vibration, cure...) non détaillés ici : importance du bon déroulement et de la conformité de ces étapes pour garantir un ouvrage durable.
- Sans formule qualifiée vis-à-vis de la durabilité, il faut souligner que l'étape de caractérisation nécessite une durée non négligeable à prendre en compte dans le planning de ce type de projet. En contrôle, il convient de prévoir d'autres indicateurs donnant déjà une tendance dans un délai plus raisonnable. Ces derniers doivent avoir été validés (nature et seuil) au préalable en études et en convenances.
- Pour chaque projet, il semble opportun d'avoir une approche spécifique de chaque indicateur de durabilité et de rechercher la meilleure réponse adaptée pour satisfaire au mieux l'ensemble d'impératifs parfois contradictoires.
- Par l'intermédiaire du suivi de l'ouvrage, il sera intéressant de vérifier la bonne corrélation entre les résultats obtenus in situ et ceux déterminés au moyen du modèle.



MERCI DE VOTRE ATTENTION

