

L'approche Performantielle de la durabilité des ouvrages en Béton



Cerema Méditerranée

02 mars 2017

**Journée technique sous l'égide de la CoTITA
« Ouvrages d'Art et enjeux environnementaux »**

Les enjeux de durabilité des ouvrages en béton armé

**Corrosion
des
armatures :**
Carbonatation,
Chlorures



Effets du gel :
Ecaillage, Gel
interne



**Réactions de
gonflement
interne :**
RAS, RSI



**Attaques
chimiques**



Les données d'entrée de la durabilité

Les classes d'exposition :

- XC1 à XC4 : Carbonatation
- XD1 à XD3, XS1 à XS3 : Chlorures
- XF1 à XF4 : Gel
- XA1 à XA3 : Attaques chimiques
- XH1 à XH3 : *RSI (guide LCPC 2007)*
- XAR1 à XAR3 : *RAS (FD P18-464)*



La Durée d'Utilisation de Projet DUP (Eurocode 0) :

« Durée pendant laquelle une structure ou une de ses parties est censée pouvoir être utilisée comme prévu en faisant l'objet de la maintenance escomptée, mais sans qu'il soit nécessaire d'effectuer des réparations majeures. »

L'approche performantielle

- Une démarche innovante, globale et prédictive de la durabilité des structures en béton armé, basée sur :
 - la notion d'indicateurs de durabilité
 - une démarche scientifique (modèles calibrés des différentes dégradations prises en compte)
 - si possible, des formules locales de béton pré-qualifiées (pour éviter des dérives en matière d'économie et de délais)
- qui nécessite que le maître d'ouvrage définisse (comme normalement prévu pour une conception selon les Eurocodes) :
 - la durée de vie souhaitée de son ouvrage
 - les fonctions de son ouvrage (utilisation, enjeux,...)
 - l'environnement local et l'exploitation attendue

Cette démarche peut venir en substitution de la démarche prescriptive habituelle.

L'approche prescriptive

- **Exigences de composition** (e/c, teneur minimale en liant ...) liées aux classes d'exposition, basées sur une DUP
 - 50 ans dans la norme NF EN 206/CN (annexe NA.F)
 - 100 ans dans le fascicule 65 du CCTG (tableau 8.B)

Tableau 8B

		Classes d'exposition																
		Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures						Attaque gel / dégel				Environnements chimiquement agressifs		
						Eau de mer			Chlorures autres que l'eau de mer									
		XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3 ^{a)}	XF4 ^{a)}	XA1	XA2	XA3 ^{a)}
Rapport $E_{s,liant}$ éq maximal ^{d)}	0,60	0,60	0,55	0,50 ¹⁾	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,45	0,50 ¹⁾	0,45	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40	
Classe de résistance minimale ^{c)}	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37 ^{p)}	C30/37 ^{p)}	C35/45	C30/37	C30/37 ^{p)}	C35/45	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45 ^{q)}	C30/37	C35/45	C40/50	
Teneur mini en liant éq (kg/m ³ , ^{b)} ^{c)} ^{d)}	280	280	300	330	330	330	350	330	330	350	330	350 ^{f)}	385 ^{o)}	385 ^{o)}	330	350	360	
Absorption d'eau maxi pour les produits préfabriqués en usine (%)	6,5 ^{m)}	6,5 ^{m)}	6 ^{m)}	6 ^{m)}	5,5 ^{m)}	5,5 ^{m)}	5 ^{m)}	6 ^{m)}	5,5 ^{m)}	5 ^{m)}	6 ^{m)}	5 ^{m)}			5,5 ^{m)}	5 ^{m)}	4,5 ^{m)}	
Teneur minimale en air (%)	–	–	–	–	–	–	–	–	–		–	– ^{r)}	4 ^{e)}	4 ^{e)}	–	–	–	
Essai(s) de performances ^{k)}												XP P 18-420	NF P 18-424 (ou NF P 18-425)	NF P 18-424 (ou NF P 18-425) XP P 18-420				
Combinaison CEM I + addition	Rapport maximal A/(A+C)																	
	Cendres volantes	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30 ⁿ⁾	0,00 ⁿ⁾	0,00 ⁿ⁾	0,30	0,30	0,30
	Fumées de silice	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	Métakaolin type A	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Laitier moulu classe A ^{s)}	0,50	0,50	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,40	0,50	0,50	0,40	0,50	0,50	0,15	0,50	0,50	0,50
	Laitier moulu classe B ou C	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,15	0,30	0,30	0,30
	Addition calcaire catégorie A	0,30	0,30	0,30	0,30	0,05	0,05	0,05	0,30	0,05	0,05	0,30	0,05	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00
	Addition calcaire catégorie B	0,25	0,25	0,25	0,25	0,05	0,05	0,05	0,25	0,05	0,05	0,25	0,05	0,25	0,05	0,00	0,00	0,00
Addition siliceuse de minéralogie QZ	0,25	0,25	0,25	0,25	0,15	0,15	0,15	0,25	0,15	0,15	0,25	0,15	0,20	0,05	0,00	0,00	0,00	

L'approche prescriptive

- **Exigences de composition** liées aux classes d'exposition, basées sur une DUP

Avantages :

Fort corpus technique et recommandation

Compatibilité entre les exigences fixées et les processus de fabrication du béton :

- *Pesées des constituants,*
- *Mesures des teneurs en eau*
- *etc.*

Retours d'expérience sur les seuils utilisés

Inconvénients :

Exigences contradictoires (XF4, RSI par exemple)

- Ne facilite pas l'innovation (bétons environnementaux, recyclage, etc.)
- Inadapté pour des durées de vie élevées (> 100 ans)

L'approche performantielle

- Exigences de performance liées aux classes d'exposition, basées sur une DUP
- Évaluation d'**indicateurs de durabilité** qui correspondent aux performances de durabilité du béton (propriétés de transfert notamment)
- Comparaison des indicateurs à des seuils (**approche absolue**) ou à des indicateurs obtenus sur un béton formulé traditionnellement (**approche comparative**)
- Validation possible (mais encadrées) de formules qui dérogent aux limites de composition de l'approche prescriptive

L'approche performantielle

- **Exigences de performance** liées aux classes d'exposition, basées sur une DUP
- Résolution des certaines contradictions de l'approche prescriptive (XF4 et RSI par exemple)
- Développement de l'innovation
- Ouverture vers des bétons plus « verts »
- Optimisation des enrobages
- Optimisation de la durabilité au regard de l'environnement

Approche prescriptive actuelle :

- Composition du liant et qualité des granulats imposées
- Justification par respect des limites de composition du béton
- Modulation restreinte des épaisseurs d'enrobages



Approche performantielle :

- Composition du béton, composition du liant et qualité des granulats non imposées * **
- Justification par essais de durabilité sur béton (essais performantiels et/ou indicateurs de durabilité)
- Épaisseurs d'enrobages modulables en fonction des propriétés de durabilité des bétons

* Constituants conformes à la norme NF EN 2016/CN et au fascicule 65

** Garde-fous sur la composition

Contexte normatif

Une méthode visée dans les textes normatifs :

- NF EN 1992-1-1 (note (1) du tableau 4.3 NF)
- NF EN 206/CN (article 5.3.3)

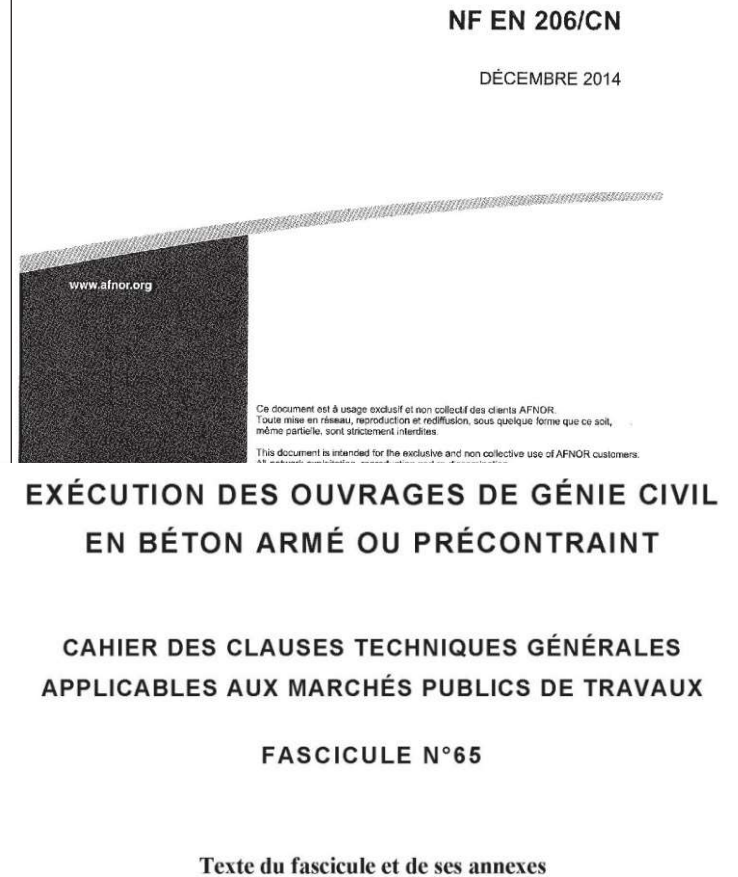
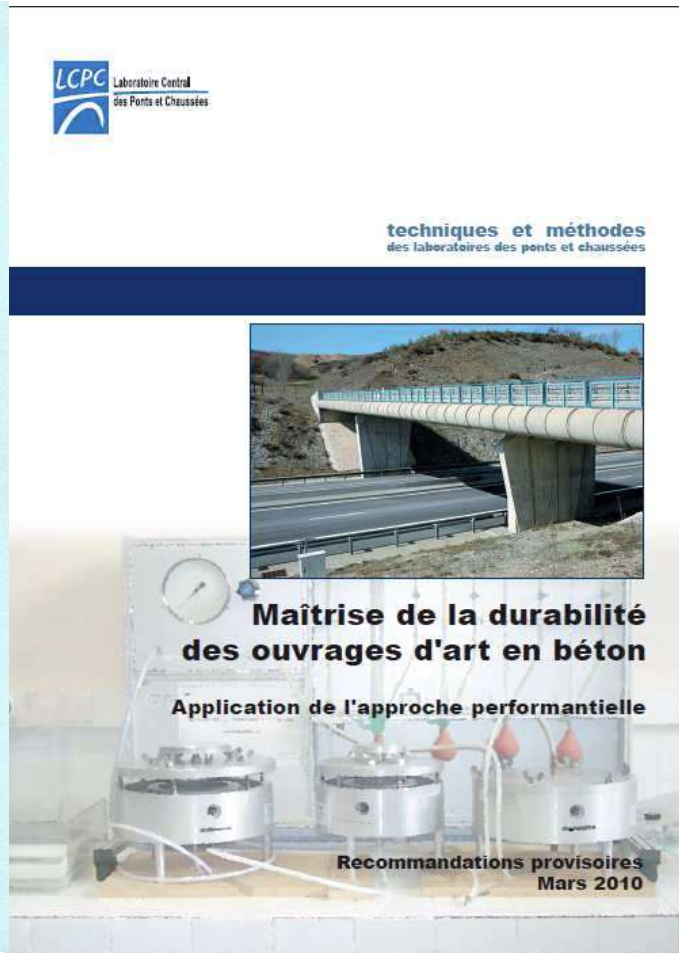
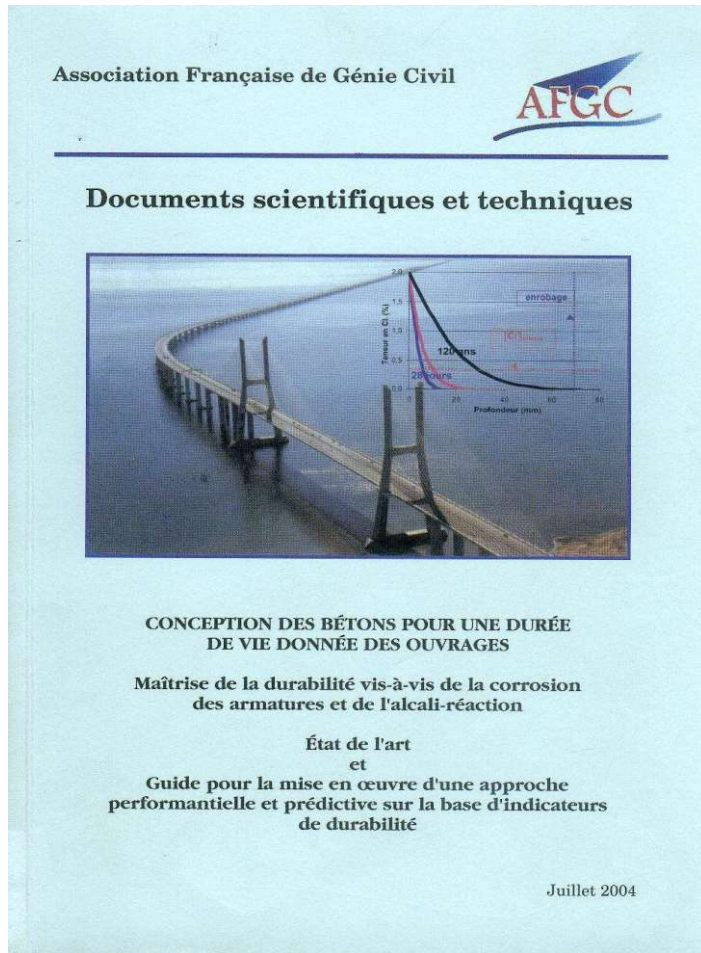
mais dont la mise en œuvre détaillée a nécessité un guide

- Recommandations provisoires en date de mars 2010 – LCPC

Utilisation de l'approche :

- Choix du maître d'ouvrage sur proposition du maître d'œuvre,
 - *ou*
- Proposition de l'entreprise validée par le maître d'ouvrage, dans la mesure où le marché a ouvert la possibilité et où la démarche proposée est respectée.

Guides et documents



Nouvelle version du Fascicule 65 facilitera et rendra encore plus explicite la possibilité d'adopter l'approche performantielle

Les 6 étapes de la démarche

- 1) Choix de la durée d'utilisation du projet
- 2) Prise en compte des conditions environnementales et des principaux risques de dégradation
=> Choix des classes d'exposition et des niveaux de prévention
- 3) Sélection des indicateurs de durabilité et des spécifications « performantielles » associées
- 4) Formulation des bétons - épreuves d'étude
=> vérifications de l'atteinte des performances des formules
- 5) Réalisation des épreuves de convenance et de contrôle
=> vérifications des performances des formules mises en œuvre
- 6) Point zéro durabilité et suivi (témoins de durée de vie)

1 Choix de la durée d'utilisation du projet

Eurocode 0 (NF EN 1990) : choix de la durée d'utilisation du projet (DUP) = 100 ans pour les ponts (avec maintenance normale et adaptée)

Au delà de 100 ans, adaptation nécessaire des seuils des indicateurs de durabilité

DUP : Il s'agit de la période au cours de laquelle la structure est censée rester normalement utilisable en étant entretenue, mais sans qu'il soit nécessaire de procéder à de grosses réparations.

Catégorie de durée d'utilisation de projet	Durée indicative d'utilisation de projet (années) EN 1990	Durée indicative d'utilisation de projet Annexe nationale Tableau 2.1(NF)	Exemples
1	10	10	Structure provisoires ⁽¹⁾
2	10-25	25	Eléments structuraux remplaçables, par exemple appareils d'appui
3	15-30	25	Structures agricoles et similaires
4	50	50	Bâtiments et autres structures courantes
5	100	100	Bâtiments monumentaux, ponts et autres ouvrages de génie civil

(1) Les structures ou parties de structures qui peuvent être démontées dans un but de réutilisation ne doivent normalement pas être considérées comme provisoires

2 Prise en compte des conditions environnementales et des principaux risques de dégradation

Choix des classes d'exposition (description des conditions environnementales)

L'approche performantielle permet de prendre en compte :

- **le risque de corrosion des armatures (XC, XD, XS)**
- **l'attaque par le gel et les sels (XF)**
- **les risques d'alcali-réaction et de RSI**

Mais elle ne prend pas en compte les attaques chimiques d'origine externe

(se référer pour cela aux prescriptions de la norme NF EN 206/CN, du fascicule 65 et du fascicule de documentation FD P 18 011 (notamment pour le milieu marin ou pour les fondants avec sulfates où les ciments PM restent imposés))

3 Sélection des indicateurs et des spécifications associées : Vis à vis du risque de corrosion des armatures

3 Indicateurs principaux :

- Porosité accessible à l'eau : P_{eau} en %
- Perméabilité aux gaz : K_{gaz} en 10^{-18} m^2
- Coef. de diffusion des chlorures : D_{app} en $10^{-12} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$

+ mesure de résistivité (pour les épreuves d'études, de convenance et de contrôle)

Fixation des seuils à respecter

Classe d'exposition	DUP de 100 ans	Seuils des indicateurs à 90 jours	Exemples de partie d'ouvrage
XC1 sec ou humide en permanence XC2 humide rarement sec		$P_{\text{eau}} < 15$	Fondations (immergées ou non) Parties enterrées des appuis
XC3 humidité modérée XC4 alternance d'humidité et de séchage		$P_{\text{eau}} < 13$ ET $K_{\text{gaz}} < 150$	Bétons protégés par une étanchéité Bétons exposés à l'air
XS1 Exposé à l'air véhiculant du sel marin XS2 Immergé en permanence dans l'eau de mer XD1 exposé à des chlorures non marins transportés par voie aérienne XD2 Humide rarement sec, béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures		$P_{\text{eau}} < 13$ ET $D_{\text{app}} < 7$	Ouvrage à proximité d'une côte Partie d'ouvrage immergée en permanence dans l'eau de mer Zones d'un ouvrage faiblement exposées aux sels de déverglaçage (semelles ou radiers non profonds à proximité de ou sous voies fréquemment salées)
XD3 Alternance d'humidité et de séchage, béton exposé à des projections contenant des chlorures XS3 Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns		$P_{\text{eau}} < 11$ ET $K_{\text{gaz}} < 150$ ET $D_{\text{app}} < 3$	Piles d'un ouvrage très exposées aux sels de déverglaçage Ouvrage soumis aux embruns (à moins de 100 m de la côte dans le cas général) Zones de marnage

Extrait Guide LCPC Mars 2010 – avec DUP 100 ans et enrobage de 30 mm (XC) et 50 mm (XD, XS)

3 Sélection des indicateurs et des spécifications associées Vis-à-vis des dégradations dues au gel et aux sels de déverglaçage

	Zone de gel modéré	Zone de gel sévère
Salage peu fréquent	XF 1 Pas de spécifications propres au gel (se reporter au tableau corrosion – classe XC4)	XF3 (G) $L_{\text{bar}} \leq 250 \mu\text{m}$ $\Delta\epsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ $f^2/f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c28} \geq 30 \text{ MPa}$
Salage fréquent	XD3 (se reporter au tableau corrosion) XD3 + XF2 pour les éléments très exposés (teneur en air $\geq 4\%$)	XF4 (G+S) $L_{\text{bar}} \leq 200 \mu\text{m}$ $E_c \leq 600 \text{ g/m}^2$ $\Delta\epsilon \leq 400 \mu\text{m/m}$ $f^2/f_0^2 \geq 75\%$ $f_{c28} \geq 35 \text{ MPa}$
Salage très fréquent	XF4 (G+S)	XF4 (G+S)

Extrait Guide LCPC Mars 2010

3 Sélection des indicateurs et des spécifications associées

Vis-à-vis du risque de réaction sulfatique interne (RSI)

Classes d'exposition	Niveau de prévention/Critère (pour un ouvrage courant)	Exemple
XH2 Alternance d'humidité et de séchage, humidité élevée	Bs $T_{\max} < 75^{\circ} \text{ C}$ <i>ou</i> $T_{\max} < 85^{\circ} \text{ C}$ et critère de performance en expansion <i>ou</i> $T_{\max} < 85^{\circ} \text{ C}$ et conditions sur choix du ciment	Piles et tabliers
XH3 En contact durable avec l'eau immersion permanente, stagnation d'eau à la surface, zone de marnage	Cs $T_{\max} < 70^{\circ} \text{ C}$ <i>ou</i> $T_{\max} < 80^{\circ} \text{ C}$ et critère de performance en expansion <i>ou</i> $T_{\max} < 80^{\circ} \text{ C}$ et conditions sur choix du ciment	Pieux et semelles de fondation

Extrait Guide LCPC Mars 2010

3 Sélection des indicateurs et des spécifications associées

Vis-à-vis du risque d'alcali-réaction

niveau de prévention B (cas des ouvrages courants)

- granulats non réactifs
- bilan des alcalins

ou

- essai de performance :

$\Delta \varepsilon < 0,020\%$ selon l'essai de performance vis-à-vis de l'alcali-réaction suivant la norme NF P18-454 et FD P18-456



4 Formulation des bétons et épreuves d'études

- Attention particulière => **durée de mûrissement de 90 j** pour certains essais
 - Prise en compte de la démarche dans le **PAQ** de l'opération (compétences, moyens, modes opératoires d'essai...)
- => Le fournisseur de béton (et son laboratoire) doit disposer de capacités techniques et de compétences
- => De même pour le contrôle extérieur
- Intérêt de disposer de **formules locales préqualifiées**
- => concept de **références probantes d'emploi** disposant de mesures des indicateurs

5 Epreuves de convenance et de contrôle

Formalisation des critères d'acceptation (critères du guide LCPC de Mars 2010)

- Epreuves de convenance :

- $P_{\text{eau}}(\text{convenance})_{28j} \leq 1,1 P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$

- $\rho(\text{convenance})_{28j} \geq 0,8 \rho(\text{étude})_{28j}$

- Epreuves de contrôle :

Epreuves de contrôle à 28 jours	Epreuves de contrôle à 90 jours
$\rho(\text{contrôle})_{28j} \geq 0,8 \rho(\text{étude})_{28j}$ $P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{28j} \leq 1,1 P_{\text{eau}}(\text{étude})_{28j}$	$P_{\text{eau}}(\text{contrôle})_{90j} \leq P_{\text{eau}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ $K_{\text{gaz}}(\text{contrôle})_{90j} \leq K_{\text{gaz}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$ $D_{\text{app}}(\text{contrôle})_{90j} \leq D_{\text{app}}(\text{spécifiée au marché})_{90j}$

6 Point zéro durabilité

- Réception de l'ouvrage avec **initiation du suivi** dans le temps
- Établissement par parties d'ouvrage d'une **synthèse «durabilité »** (**spécifications attendues, indicateurs retenus et seuils, mesures des indicateurs, mesures des enrobages**)
- Définition des parties d'ouvrage qui feront l'objet d'un **suivi de durabilité (nature et périodicité selon conditions d'exposition)**
- **Inspections ciblées avec mesure des témoins de durée de vie**

- Vis-à-vis de la carbonatation :

Evaluation de la profondeur de carbonatation (zone ou $\text{pH} < 9$) ou évolution du profil de teneur en CaCO_3

- Vis-à-vis des chlorures :

Evaluation de la profondeur de pénétration des chlorures (zone ou $[\text{Cl}^-] > [\text{Cl}^-]_{\text{crit}}$) ou Évolution du profil de chlorures

Exemple récent d'application : Bateau porte de la forme 10 à Marseille (GPMM)



- Durabilité visée de l'ouvrage : 50 ans
 - Ouvrage en béton précontraint avec une forte densité ferrailage passif et actif
 - 3 600 m³ de béton avec des pièces de faible épaisseur
 - Immersion permanente eau de mer : forte agressivité du milieu naturel sur le matériau béton armé
- Forts Enjeux de durabilité

Conclusion

L'approche performantielle est ...

- une façon de répondre à l'**enjeu croissant de durabilité** dans un cadre rationnel et « contractuel »
- un choix de maîtrise d'ouvrage, à assumer (en cohérence avec la **responsabilisation** issue des Eurocodes)
- une approche « rôdée » dans le cadre de grands ouvrages concédés (**justification** de durabilité)

Cette approche nécessite une **anticipation de la problématique « matériau »**.

L'approche performantielle **ne dispense** ni de bonne conception, ni de qualité d'exécution, ni de la qualité du contrôle lors de la construction, ni d'entretien...

Merci de votre attention

Nathalie Cordier

Cerema Med/Labo Aix/SOAB

Nathalie.cordier@cerema.fr