



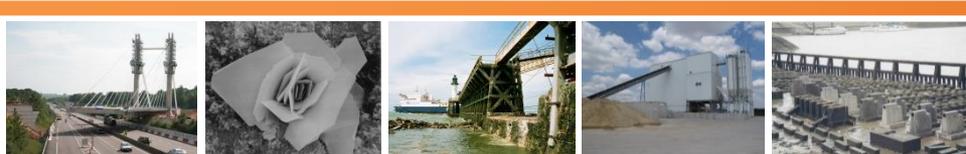
INTRODUCTION

www.perfdub.fr

*approche **PER**Formantielle de la **DU**rabilité
des ouvrages en **B**éton*

*Gilles ESCADEILLAS (LMDC)
François CUSSIGH (VINCI Construction)*

- ▶ Avant 1981 (depuis 1906 !) : Béton au **DOSAGE** (exemple 350 kg/m³ de CLK)
 - Pas d'exigence directe de résistance
 - Pas d'exigence directe de durabilité (hormis via le type de ciment)
- ▶ 1981 : Norme P18-305 : béton à la **RESISTANCE** « BCN » (exemple B25)
 - Exigence directe de résistance
 - Pas d'exigence directe de durabilité (hormis via le type de ciment **et son dosage**)
- ▶ 1994 : Norme P18-305 : béton à la résistance « BCN » avec **CLASSE D'ENVIRONNEMENT** (exemple B25 E:2b1)
 - Exigence directe de résistance
 - Exigence indirecte de durabilité (via le **dosage en liant équivalent** et le rapport E/L_{eq})



- ▶ 2005 : Norme NF EN 206-1 « BPS » avec **CLASSE D'EXPOSITION** (exemple C25/30 XF1)
 - Exigence directe de résistance
 - Exigence indirecte de durabilité (via le **dosage en liant équivalent** et le rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$)
- ▶ 2012 : Norme NF EN 206/CN BIPS (béton d'ingénierie)
- ▶ 2022 : Exigence directe de durabilité via des **ESSAIS PERFORMANTIELS** (sans limites usuelles de composition)



Approche prescriptive usuelle :

- Composition du liant et qualité des granulats imposées
- Justification par respect des limites de composition du béton
- Epaisseurs d'enrobages fixées



Approche performantielle visée :

- Composition du béton, composition du liant et qualité des granulats non imposées *
- Justification par essais de durabilité sur béton (essai(s) performantiel(s) et/ou indicateurs de durabilité)
- Epaisseurs d'enrobages modulées

** les constituants doivent toutefois être aptes à l'emploi selon la norme NF EN 206/CN*



► Recherches AFPC-AFREM (ex AFGC)

■ Méthodes d'essai publiées en 1997

- Porosité à l'eau
- Perméabilité au gaz
- Mesure de profondeur de carbonatation
- Essai de carbonatation accéléré (50% CO₂)
- Mesure des teneurs en chlorures libres et totaux



► **Projet National BHP 2000 (1995-2003, 4665 k€)**

15 formules de béton
(de bétons ordinaires jusqu'à des bétons à très hautes performances)



Etude de laboratoire sur
échantillons âgés de 28 jours
(essais accélérés)



Suivi de 46 murets en T
dans 4 différentes régions
(conditions d'exposition)



Durabilité potentielle



Durabilité in situ



	Béton	Gravillon calcaire 12,5/20 (kg/m ³)	Gravillon calcaire 5/12,5 (kg/m ³)	Sable calcaire 0/5 (kg/m ³)	Sable silico-calcaire (kg/m ³)	Ciment CEM I 52,5 (kg/m ³)	CV (kg/m ³)	FS (kg/m ³)	Eau d'ajout (L/m ³)	AEA (e.s.)* (kg/m ³)	SP (e.s.)* (kg/m ³)	Retardateur (e.s.)* (kg/m ³)	E/C	E/liant
BO	M25CVEA	586	454	411	405	189	49	0	159	0,54	0,0	0,0	0,84	0,67
	M25CV	623	369	456	449	195	48	0	187	0	0,0	0,0	0,96	0,77
	M25	619	388	453	446	230	0	0	193	0	0,0	0,0	0,84	0,84
	M25EA	574	454	433	427	230	0	0	160	0,31	0,0	0,0	0,70	0,70
	M30CV	565	421	443	436	223	95	0	166	0	1,1	1,4	0,74	0,52
	M50CVEA	452	422	322	317	428	107	0	192	1,44	0,0	0,0	0,45	0,36
	M50EA	477	390	368	364	483	0	0	188	1,32	0,0	0,0	0,39	0,39
	M50CV	503	453	408	401	325	79	0	181	0	0,0	0,0	0,56	0,45
BHP et BTHP	M50	509	428	406	400	410	0	0	197	0	0,0	0,0	0,48	0,48
	M75FSEA	550	437	414	408	387	0	23	132	0,58	12,9	2,7	0,34	0,32
	M75EA	489	443	338	332	557	0	0	151	0,98	14,8	3,9	0,27	0,27
	M75	550	475	407	401	461	0	0	146	0	12,4	3,3	0,32	0,32
	M75FS	579	465	442	435	360	0	22	136	0	12,0	2,5	0,38	0,36
	M100FS	561	488	439	432	377	0	38	124	0	12,5	2,6	0,33	0,30
	M120FS	554	437	413	407	470	0	57	124	0	15,6	3,3	0,26	0,23



► Projet National BHP 2000 : essais de durabilité

Béton	E/C	Age (j)	R _{m28} (MPa)	Poro (eau) (%)	K _g (10 ⁻¹⁸ m ²)	Dcl (mig.) (10 ⁻¹² m ² .s ⁻¹)	C _a	Prof. carbo (mm)
M25CV	0,96	28	23,5	15,0	206	9,5	4,0	19,5
M25	0,84	28	24,5	14,6	978	10,0	5,0	21,9
BO	0,43	28	39,0	-	270	17,5	2,0	13,0
B32	0,44	90	42,8	12,8	338	-	3,2	0
M30CV	0,74	28	48,5	12,6	54	1,7	2,3	3,5
M50	0,48	28	55,5	14,4	69	8,7	3,8	0
B60	0,34	90	68,8	10,1	196	-	2,2	0
M75	0,32	28	75,0	11,5	106	5,6	1,3	0
BHP	0,35	28	84,0	-	240	4,8	1,1	0
M75FS	0,38	28	85,5	10,0	167	0,8	0,8	0
B80	0,30	90	97,9	9,3	30	-	1,0	0
M100FS	0,33	28	109,0	8,4	17	0,30	0,6	0
M120FS	0,26	28	127,5	7,4	43	0,04	0,4	0



► **Projet National BHP 2000 : sites d'exposition**

← XF4 (Maurienne)

XS3 (La Rochelle)



► **Projet National BHP 2000 : sites d'exposition**



← XC4 (Melun)



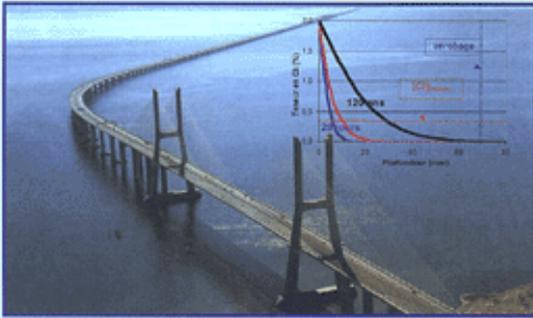
XF3 (Canada, Univ. Laval) →



► Mise en œuvre de l'approche performantielle

Association Française de Génie Civil 

Documents scientifiques et techniques



CONCEPTION DES BÉTONS POUR UNE DURÉE DE VIE DONNÉE DES OUVRAGES
Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction

État de l'art
et
Guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité

Juillet 2004

		Classes et valeurs limites				
Durabilité potentielle →		Très faible	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
G	Porosité accessible à l'eau (%) P_{eau}		14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
S	Porosité mesurée par intrusion de mercure ($P_{Hg, max} = 400$ MPa et prétraitement par étuvage à $T = 45$ °C pendant 14 jours en présence de gel de silice) (%) P_{Hg}	> 16	13 à 16	9 à 13	6 à 9	3 à 6
S	Résistivité électrique ($\Omega.m$) ρ	< 50	50 à 100	100 à 250	250 à 1000	> 1000
G	Coefficient de diffusion <i>effectif</i> des chlorures ($10^{-12} m^2.s^{-1}$) D_{eff}	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
G	Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de migration) ($10^{-12} m^2.s^{-1}$) $D_{app(mig)}$				1 à 5	< 1
G	Coefficient de diffusion <i>apparent</i> des chlorures (mesuré par essai de diffusion) ($10^{-12} m^2.s^{-1}$) $D_{app(diff)}$	> 50	10 à 50	5 à 10	< 5	
G	Perméabilité apparente aux gaz (à $P_{extrés} = 0,2$ MPa et après étuvage à $T = 105$ °C) ($10^{-18} m^2$) K_{gaz}	> 1000	300 à 1000	100 à 300	10 à 100	< 10
G	Perméabilité à l'eau liquide (à P_{max} , par mesure directe du flux, après saturation, cf. § 7.2.4.1 et 7.2.4.2) ($10^{-18} m^2$) $k_{eq}^{(*)}$	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01



► Mise en œuvre de l'approche performantielle

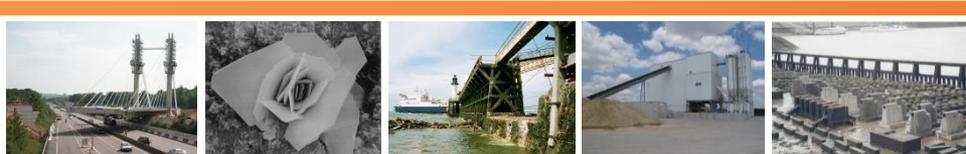
> 120 ans <i>Ouvrages dits exceptionnels</i> Niveau 5	de 100 à 120 ans <i>Grands ouvrages</i> Niveau 4	de 50 à 100 ans <i>Bâtiment et Ouvrages de génie civil</i> Niveau 3	de 30 à 50 ans <i>Bâtiment</i> Niveau 2	< 30 ans Niveau 1	Durée de vie exigée / Catégorie d'ouvrage / Niveau d'exigence ←		Type de développement ↓	
• $P_{\text{dur}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$	• $P_{\text{dur}} < 12$ • $K_{\text{gaz}} < 100$	• $P_{\text{dur}} < 14$ ⁽⁵⁾	• $P_{\text{dur}} < 16$	• $P_{\text{dur}} < 16$	Sec et très sec (HR < 65%) ou humide en permanence		1	Corrosion induite par carbonatation (e = 30 mm)
• $P_{\text{dur}} < 9$ • $K_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{dur}} < 12$ • $K_{\text{gaz}} < 100$	• $P_{\text{dur}} < 14$ ⁽⁵⁾	• $P_{\text{dur}} < 16$	• $P_{\text{dur}} < 16$	Humide (HR > 80%)		2	
• $P_{\text{dur}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{dur}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ ⁽⁴⁾	• $P_{\text{dur}} < 12$ ⁽⁷⁾ • $K_{\text{gaz}} < 100$ ⁽⁸⁾	• $P_{\text{dur}} < 14$ ⁽⁶⁾	• $P_{\text{dur}} < 15$	Modérément humide (65 < HR < 80%)		3	
• $P_{\text{dur}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{dur}} < 9$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{dur}} < 12$ ⁽⁷⁾ • $K_{\text{liq}} < 0,1$ ⁽⁹⁾	• $P_{\text{dur}} < 14$ ⁽⁶⁾	• $P_{\text{dur}} < 16$	Cycles fréquents d'humidification-séchage		4	
• $P_{\text{dur}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 10$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{dur}} < 12$ • $D_{\text{app(mig)}} < 20$ • $K_{\text{liq}} < 0,1$ ⁽⁵⁾	• $P_{\text{dur}} < 14$	• $P_{\text{dur}} < 15$	• $P_{\text{dur}} < 16$	5.1 [Cl] faible ⁽¹⁾	Exposition aux sels marins ou de déverglaçage	5	Corrosion induite par les chlorures (e = 50 mm)
					5.2 [Cl] forte ⁽²⁾			
• $P_{\text{dur}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{dur}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $k_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{dur}} < 11$ • $D_{\text{app(mig)}} < 2$ • $K_{\text{liq}} < 0,1$ ⁽³⁾	• $P_{\text{dur}} < 11$	• $P_{\text{dur}} < 14$	Immersion dans l'eau contenant des chlorures		6	
• $P_{\text{dur}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$	• $P_{\text{dur}} < 12$ • $D_{\text{app(mig)}} < 5$	• $P_{\text{dur}} < 13$ • $D_{\text{app(mig)}} < 7$	• $P_{\text{dur}} < 13$	• $P_{\text{dur}} < 15$	Zone de marnage		7	
• $P_{\text{dur}} < 9$ • $D_{\text{app(mig)}} < 1$ • $K_{\text{gaz}} < 10$ • $K_{\text{liq}} < 0,01$	• $P_{\text{dur}} < 10$ • $D_{\text{app(mig)}} < 2$ • $K_{\text{gaz}} < 100$ • $k_{\text{liq}} < 0,05$	• $P_{\text{dur}} < 11$ • $D_{\text{app(mig)}} < 3$ • $K_{\text{liq}} < 0,1$ ⁽³⁾	• $P_{\text{dur}} < 11$	• $P_{\text{dur}} < 14$				



► Programme de recherche GrandDuBé (2007, 800 K€)

■ Essais inter-laboratoires

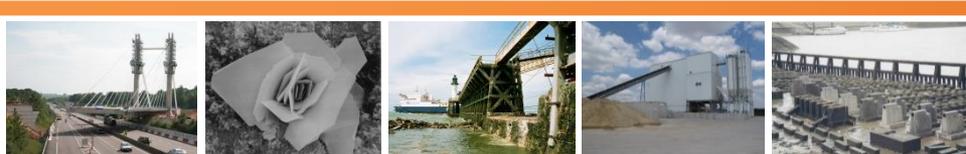
- Migration des ions chlorure
- Essai accéléré de carbonatation
- Porosité
- Perméabilité au gaz
- Essai d'ettringite différée...



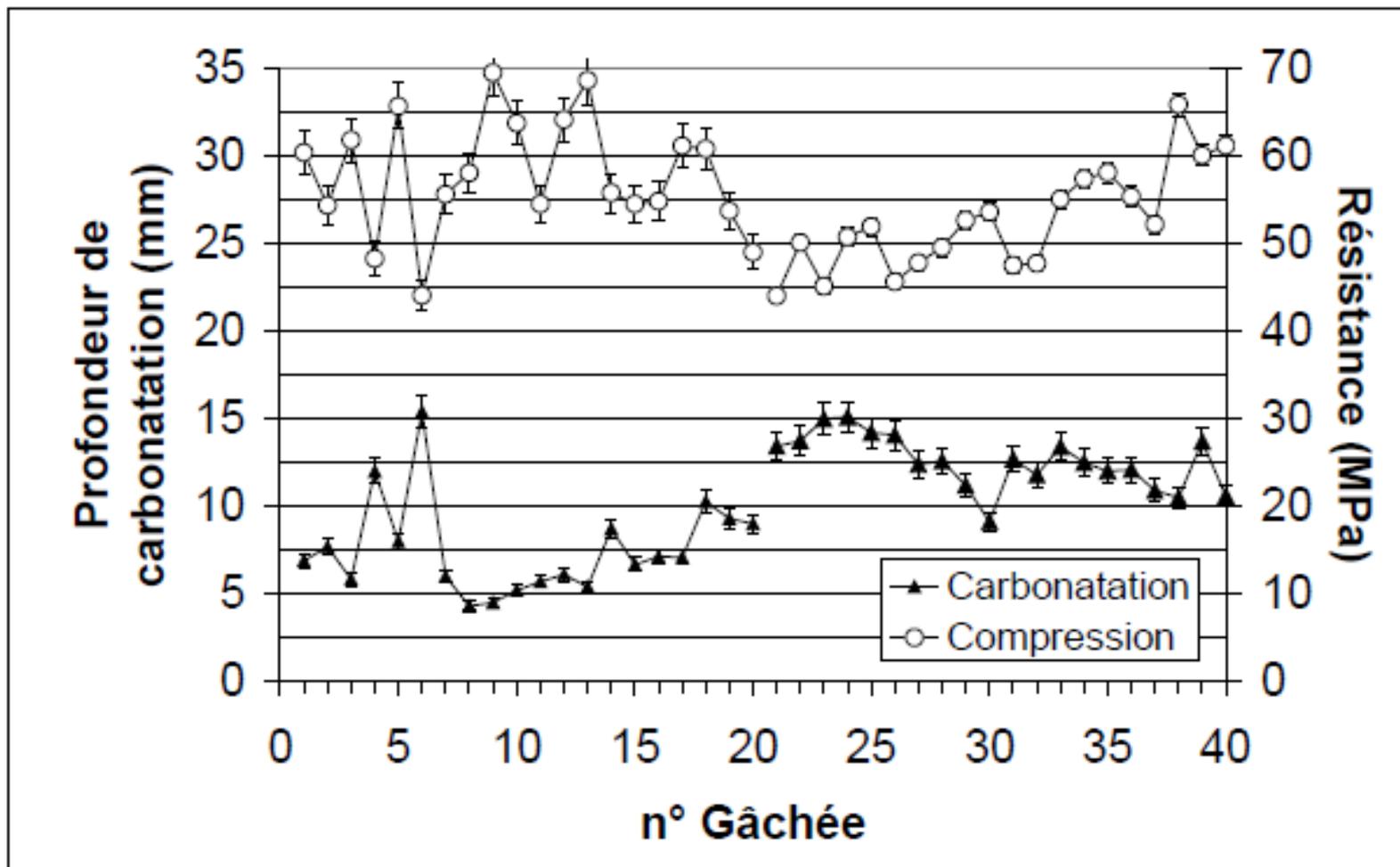
► Programme de recherche APPLET (2007-2010, 4318 k€)

■ Deux ouvrages de génie civil (viaduc et tunnel)

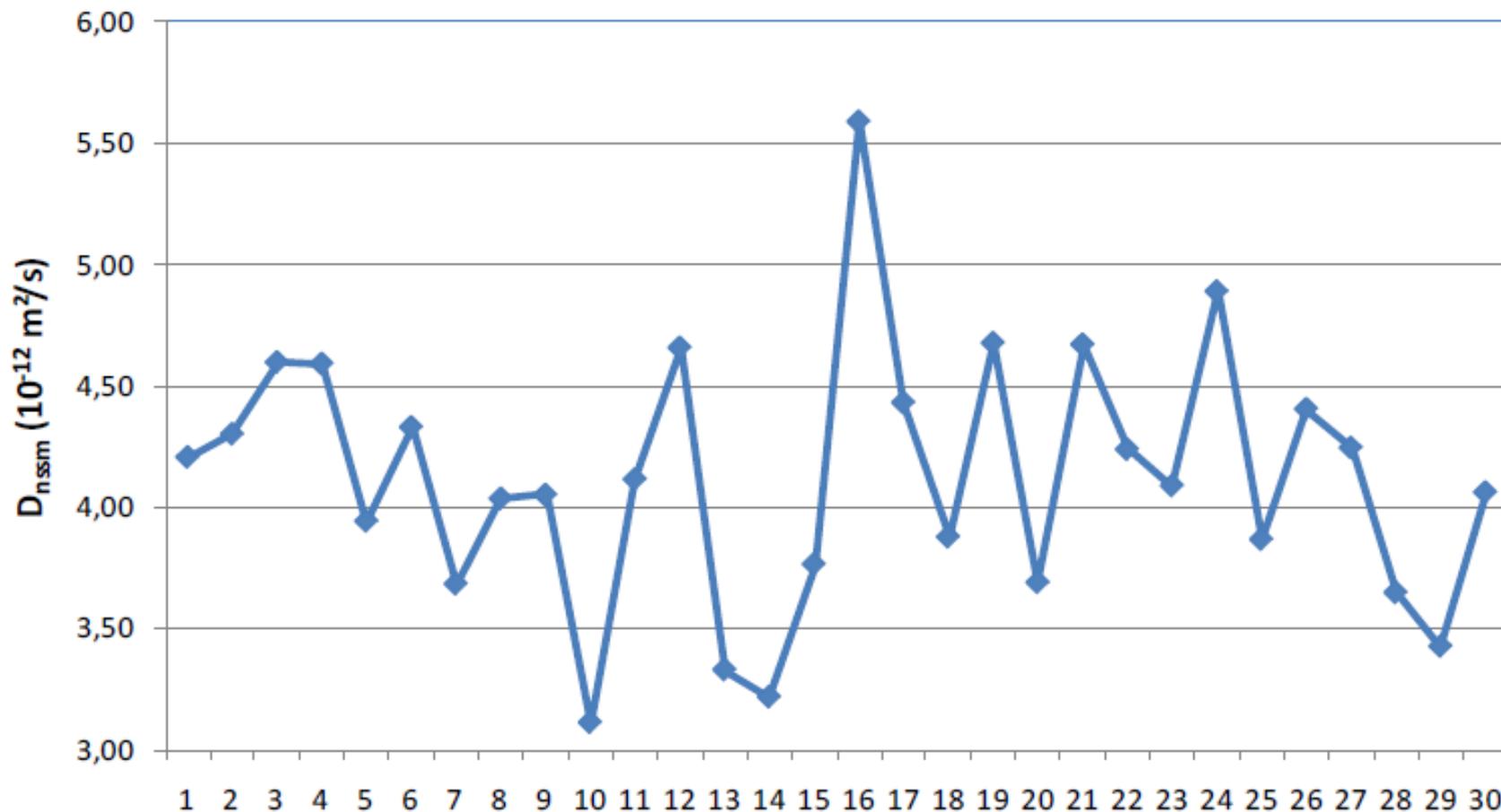
- Bétons C50/60 CEM I + CV, C35/45 CEM III
- 40 échantillons de chaque béton sur une période de 12 mois
- Essais de durabilité sur éprouvettes moulées
- Élément témoin pour mesures in situ
- Essais de durabilité sur éprouvettes carottées



► Programme de recherche APPLET : carbonatation



► Programme de recherche APPLET : diffusion des chlorures

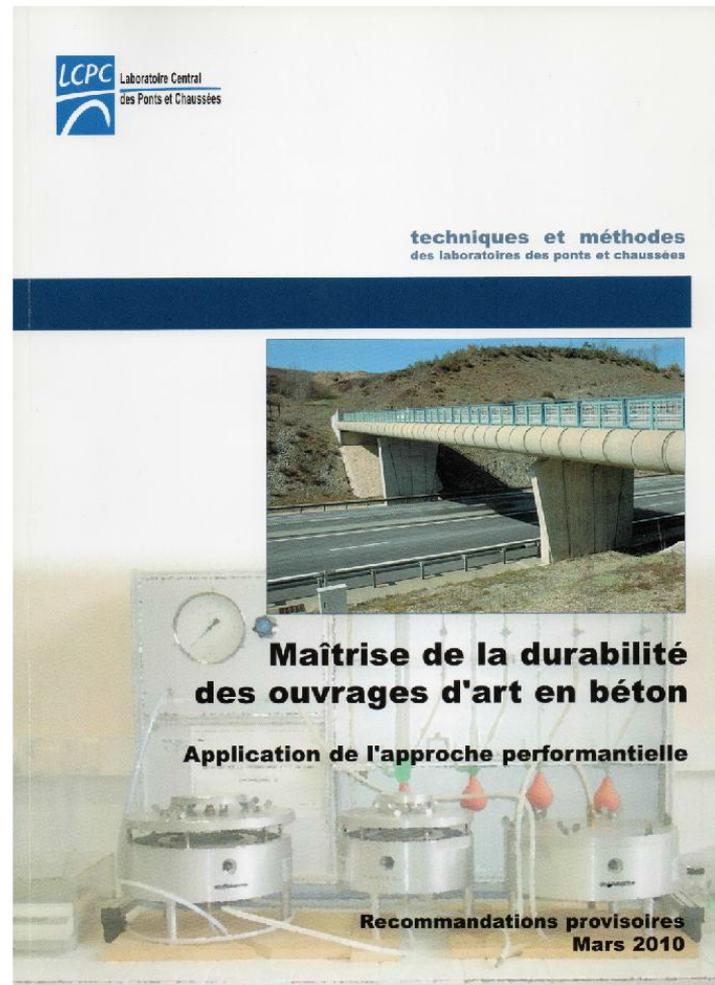


► Méthodes d'essais normalisées

- **XP P 18-458 (2008)** Essai pour béton durci – Essai de carbonatation accélérée
- **NF P 18-459 (2010)** Essai pour béton durci – Porosité et masse volumique
- **XP P 18-463 (2011)** Essai pour béton durci – Essai de perméabilité
- **XP P 18-462 (2012)** Essai pour béton durci- Essai de migration accélérée des ions chlorure en régime transitoire
- **XP P 18-461 (2012)** Essai pour béton durci- Essai de migration accélérée des ions chlorure en régime permanent



► **Synthèse des approches « COMPARATIVE » et « ABSOLUE »**



► Partenaires

52 organismes sont partenaires du projet national PERFDUB :



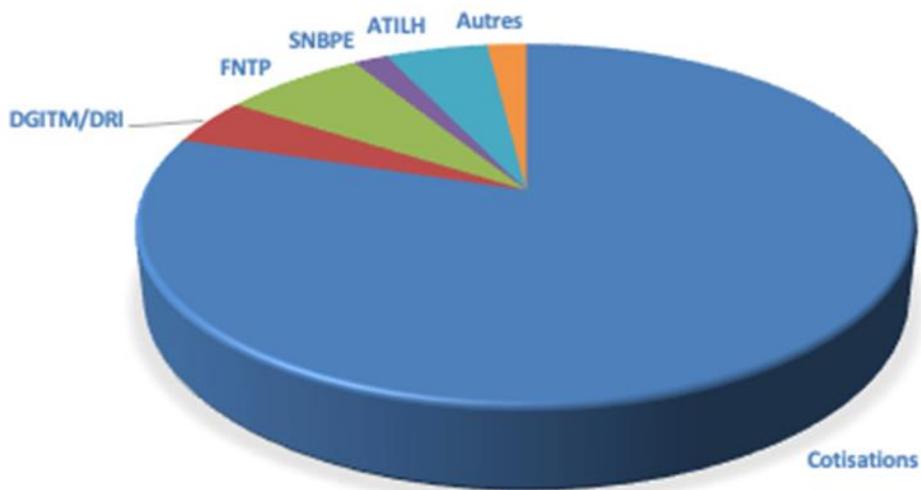
52 PARTENAIRES



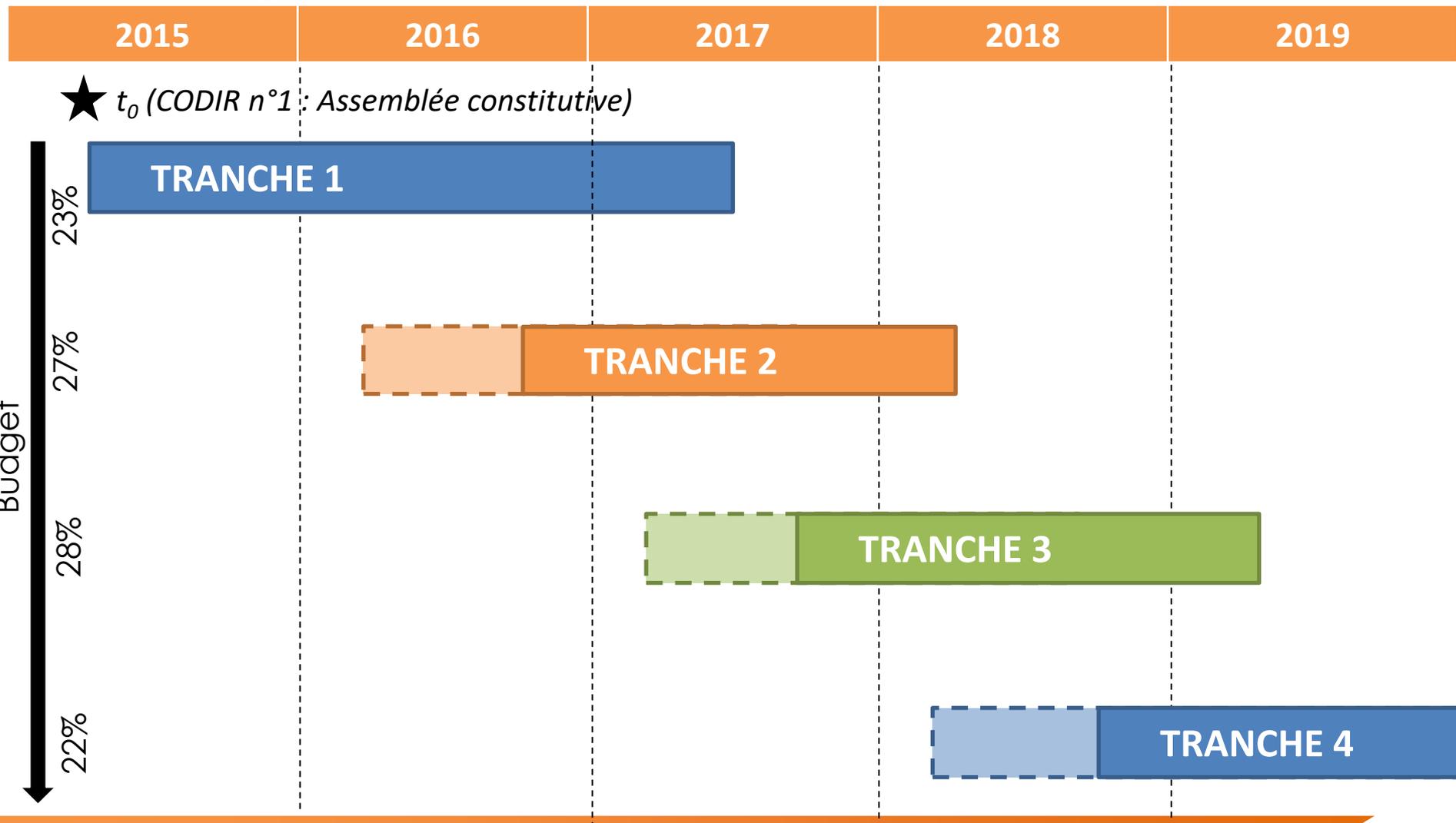
► Budget

		TRANCHE 1 (mars 2015 - juin 2017)	TRANCHE 2 (septembre 2016 - mars 2018)	TRANCHE 3 (septembre 2017 - mars 2019)	TRANCHE 4 (septembre 2018 - décembre 2019)
CHARGES (B)	1 113 534,14 €	298 932,19€	305 782,10 €	180 345,87 €	328 473,98 €
Apports en nature (C)	2 304 203,16 €	821 075,51 €	642 957,15 €	343 382,50 €	496 788,00 €
TOTAL (B+C)	3 417 737,30 €	1 120 007,70 €	948 739,25 €	523 728,37 €	825 261,00 €

RESSOURCES DU PN PERFDUB (SUBVENTIONS)



► Planning



► Objectifs généraux

- **Rendre l'approche performantielle opérationnelle et d'usage courant**
 - Utilisable facilement par les maîtres d'œuvre, bureaux d'études, entreprises
 - Sécuritaire et avantageuse pour les maîtres d'ouvrage (durabilité des ouvrages, intérêts économique et écologique)
- Définir une **méthodologie à l'échelle nationale de justification de la durabilité des bétons et des structures en béton par une approche performantielle** (méthodes absolue et comparative)
 - Agréger les connaissances et le retour d'expérience
 - Combler les manques
- **Transposer la méthodologie développée au niveau européen**
 - Associer un comité de suivi international



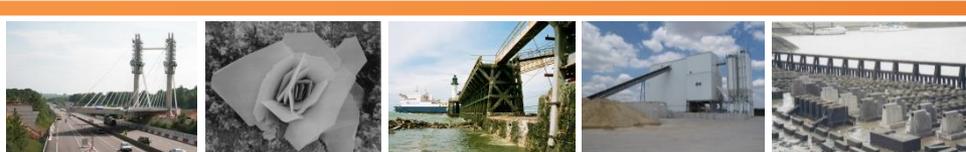
► Problématiques

- **Bétons de référence**
 - Éléments clés dans l'approche performantielle « comparative »
 - **A définir en fonction des classes d'exposition et de la durabilité visée**
- **Seuils de performance admissibles**
 - Éléments clés pour l'approche performantielle « absolue »
 - **A définir en fonction des classes d'exposition et de la durabilité visée**
- **Modélisation**
 - Pertinence des modèles de vieillissement, facilité d'utilisation, ...
 - **Nécessité d'évaluer les modèles existants et de proposer des modèles simplifiés (semi-analytiques) ou raffinés (numériques)**
- **Responsabilités et engagements des acteurs**
 - **Nécessité de définir un cadre réglementaire**



► Problématiques

- **Essais de durabilité (indicateurs de durabilité, essais accélérés)**
 - Choix des essais (manque de lisibilité)
 - Manque d'essais de caractérisation rapides normalisés
 - Difficulté de certains protocoles (pré-conditionnement)
 - **Nécessité de classifier les essais, de développer et de normaliser des essais plus rapides, de consolider certains protocoles...**
- **Variabilité**
 - Variabilité des caractéristiques des bétons, incertitude des méthodes opératoires, ...
 - **Nécessité de développer une approche probabiliste**



► Champs de recherche

- **Ouvrages de génie civil** (fascicule 65 du CCTG)
- **Bâtiments complexes** (ouvrages de catégorie B et C)
- **Certains produits préfabriqués en usine**

- **Ouvrages neufs**
- **Ouvrages anciens**
 - Relier les pathologies ou le vieillissement observé au type de béton et à ses caractéristiques de durabilité

- **Pathologies courantes**
 - Carbonatation, chlorures, gel interne / écaillage
 - Attaques chimiques externes (sulfatiques, acides, biologiques)



► Organisation thématique

■ Thème 1 : Essais de durabilité

- Corrélation indicateurs / carbonatation, optimisation de certains modes opératoires, essais croisés, étude « ageing effect », ...

■ Thème 2 : Définition des seuils de performance admissibles

- Exploitation de données expérimentales (base de données, corps d'épreuve, ouvrages anciens, ...), utilisation de modèles de vieillissement (synergie avec ANR MODEVIE)

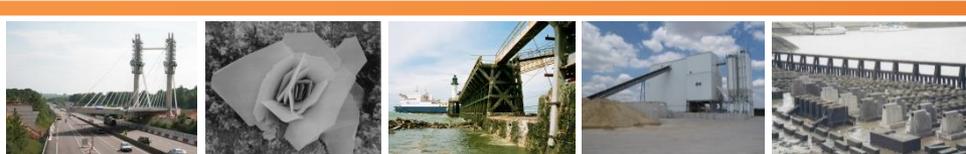
■ Thème 3 : Bétons à étudier – Bétons de référence

- Paramètres (liant, granulats, $E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$, ...), tableaux NA F, variabilité spatiale et temporelle

■ Thème 4 : Contractualisation de l'approche

- Contexte contractuel, CCTP Type, contrôles de conformité

■ Thème 5 – Valorisation des résultats (France et Europe)



Bonne journée de restitution

