

Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives

Doublement du viaduc de Volesvres



C. Aubagnac – Cerema – DTer CE – DL
Autun

ENPC Marne-la-Vallée - 23 octobre 2014

APB du viaduc de Volesvres

Remerciements aux contributeurs de la DTer Centre-Est du
Cerema à cette démarche:

**Pascal Bligny, Benoît Clément, Christian Lacroix,
Marjorie Rabasse du DL Autun**

Bruno Boulet du DL Clermont-Ferrand

et au LNEC de Lisbonne:

Nuno Gomez et Manuela Salta



ENPC Marne-la-Vallée - 23 octobre 2014



APB du viaduc de Volesvres – le contexte

Forte motivation de la **DIR Centre Est** pour tester l'application de la démarche d'approche performantielle sur les bétons d'ouvrages d'art et **la rendre « à terme » contractuelle.**

Motivation surtout liée à ses missions d'**exploitant d'un réseau routier** : recherche de la plus grande « durée d'utilisation » des ouvrages avec **le moins d'interventions de maintenance possible.**

Une première expérience lors de la construction du **pont sur le Cher**, où l'approche performantielle a été rendue contractuelle pour certains bétons.

Opportunité de la construction de l'ouvrage de doublement du **viaduc de Volesvres...**

APB du viaduc de Volesvres – présentation de l'OA

Construction de l'ouvrage de doublement du viaduc de
**Volesvres (71) dans le cadre de la mise à 2 x 2 voies de la
RN 79 (RCEA)**

Maître d'Ouvrage: **DREAL Bourgogne**

Maître d'Oeuvre: **DIR Centre Est**

Marché attribué au groupement d'entreprises **CBR-TP**
(mandataire), SNCTP et IOA Construction + ZM pour le lot
« charpente métallique »

5 travées continues de 32 à 52 mètres de portée (long. totale
206 m)

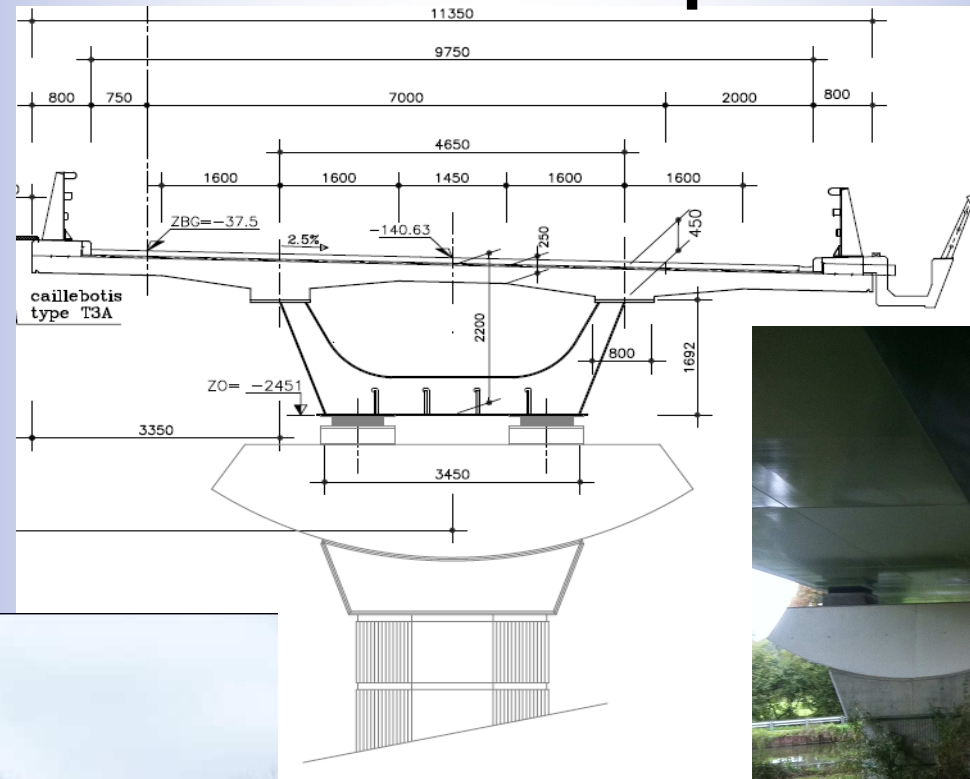
Tablier en caisson mixte de hauteur constante :

- caisson métallique ouvert, avec âmes inclinées
- hourdis supérieur constitué par une dalle en béton armé d'environ
0,30 m d'épaisseur moyenne

Culées enterrées en Béton Armé, fondées sur pieux

Piles architecturées en Béton Armé, fondées sur pieux

APB du viaduc de Volesvres – présentation de l'OA



APB du viaduc de Volesvres – le contexte

Prescription des bétons suivant l'approche prescriptive classique (NF EN206-1 + F65 du CCTG de décembre 2008 + préventions RAS, RSI, Gel interne et écaillage).

Décision de tester sur cet ouvrage, **de façon volontaire et non contractuelle**, l'application des **Recommandations provisoires « Maîtrise de la durabilité des ouvrages d'art en béton – Application de l'approche performantielle »** du **LCPC de mars 2010** sur le **béton des appuis** et le **béton du hourdis** du tablier en ossature mixte (classes d'exposition **XC4/XF1**).

Démarche soutenue par l'**IFSTTAR** (groupe Innovations OA du RST).

Dès le démarrage des travaux :

- **Sensibilisation des acteurs du chantier** (entreprises, fournisseur de bétons : société BCMC « Béton Contrôlé Montceau le Creusot ») à cette démarche;
- **Association de la profession** (ATILH, SNBPE et CIMBéton).

APB du viaduc de Volesvres – Plan de contrôle

Etablissement d'un **programme de contrôle**, se conformant aux préconisations des Recommandations provisoires du LCPC, basé sur le planning général prévisionnel des travaux hors intempéries

Partie d'ouvrage	Volume (m3)	Volume cumulé (m3)	Date prévisionnelle de coulage	LRPC AUTUN et CLERMONT-FERRAND					Laboratoires des cimentiers (Lafarge et Calcia)			
				Porosité accessible à l'eau Peau (%) à 28 jours	Résistivité à 28 jours	Porosité accessible à l'eau Peau (%) à 90 jours	Résistivité à 90 jours	Perméabilité aux gaz Kgaz (10-18 m2) à 90 jours	Porosité accessible à l'eau Peau (%) à 28 jours	Résistivité à 28 jours	Porosité accessible à l'eau Peau (%) à 90 jours	Perméabilité aux gaz Kgaz (10-18 m2) à 90 jours
Epreuve de convenue « béton des pieux » centrale Gueugnon			01/06/10	X	X	X	X					
Epreuve de convenue « béton des appuis » centrale Gueugnon			01/06/10	X	X	X	X	X				
Epreuve de convenue « béton des appuis » centrale Blanzay			05/07/10			X	X	X				
Epreuve de convenue « béton du hourdis » centrale Gueugnon			15/09/10	X	X	X	X	X	X		X	X
Epreuve de convenue « béton du hourdis » centrale Blanzay			28/09/10	X	X	X	X	X			X	X
Epreuves de contrôle												
Semelle pile P1	49,5	49,5	24/09/10	X	X							
Semelle pile P3	49,5	99	23 août au 24 septembre 2010									
Semelle pile P2	49,5	148,5	23 au 28 septembre 2010									
Raidisseur pile P1	10,5	159	27 septembre au 01er octobre 2010									
Raidisseur pile P2	10,5	169,5	27 septembre au 01er octobre 2010									
Raidisseur pile P3	10,5	180	04/10/10						XX			
Semelle pile P4	49,5	229,5	15/10/10	X	X				X			
Chevêtre pile P1	20,75	250,25	28 septembre au 11 octobre 2010									
Raidisseur pile P4	10,5	260,75	20/10/10	idem prélèvement fût P3								
Élévation pile P1	18,8	277,55	5 au 8 octobre 2010									
Élévation pile P2	18,8	294,35	11 au 15 octobre 2010									
Chevêtre pile P2	20,75	315,1	12 au 18 octobre 2010									
Sommier culée C0	73,75	388,85	18 au 29 octobre 2010									
Élévation pile P3	18,8	405,65	20/10/10	X	X	X	X	X				
Chevêtre pile P3	20,75	426,4	18/11/10	X	X						X	X
Mur garde-grève culée C0	18,79	443,19	13/12/10	X	X	X	X	X			XX	XX
Élévation pile P4	18,8	459,99	02 au 17 novembre 2010									
Sommier culée C5	73,75	533,74	02 au 17 novembre 2010									
Chevêtre pile P4	20,75	554,49	03 au 18 novembre 2010	X	X							
Mur garde-grève culée C5	18,79	571,28	18 au 26 novembre 2010									
Mur retour Ouest C5 (convenue G+S)			13/12/10			X	X	X				

APB du viaduc de Volesvres – Plan de contrôle

Implication des **Départements Laboratoires d'Autun et de Clermont-Ferrand de la DTer CE du Cerema**, ainsi que les laboratoires centraux des cimentiers : **Calcia CTG et Lafarge LCR** :

Modes opératoires d'essais conformes à l'annexe 1 des Recommandations LCPC: « Modes opératoires simplifiés : Résistivité électrique et migration des ions chlorure sous champ électrique. Porosité à l'eau. Perméabilité au gaz Cembureau »

+ établissement par le CETE de Lyon d'un document « **Modes opératoires communs** - essais de porosité accessible à l'eau et de résistivité électrique sur bétons durcis »
(suite à la réunion du 22 février 2011: bilan suivi de la formule « béton d'appuis »)

En outre Lafarge LCR a réalisé des **essais de carbonatation accélérée** en laboratoire et des **essais de carbonatation naturelle** en conditions abritées ou non sur le site de l'ouvrage et sur un autre site.

APB du viaduc de Volesvres – Plan de contrôle

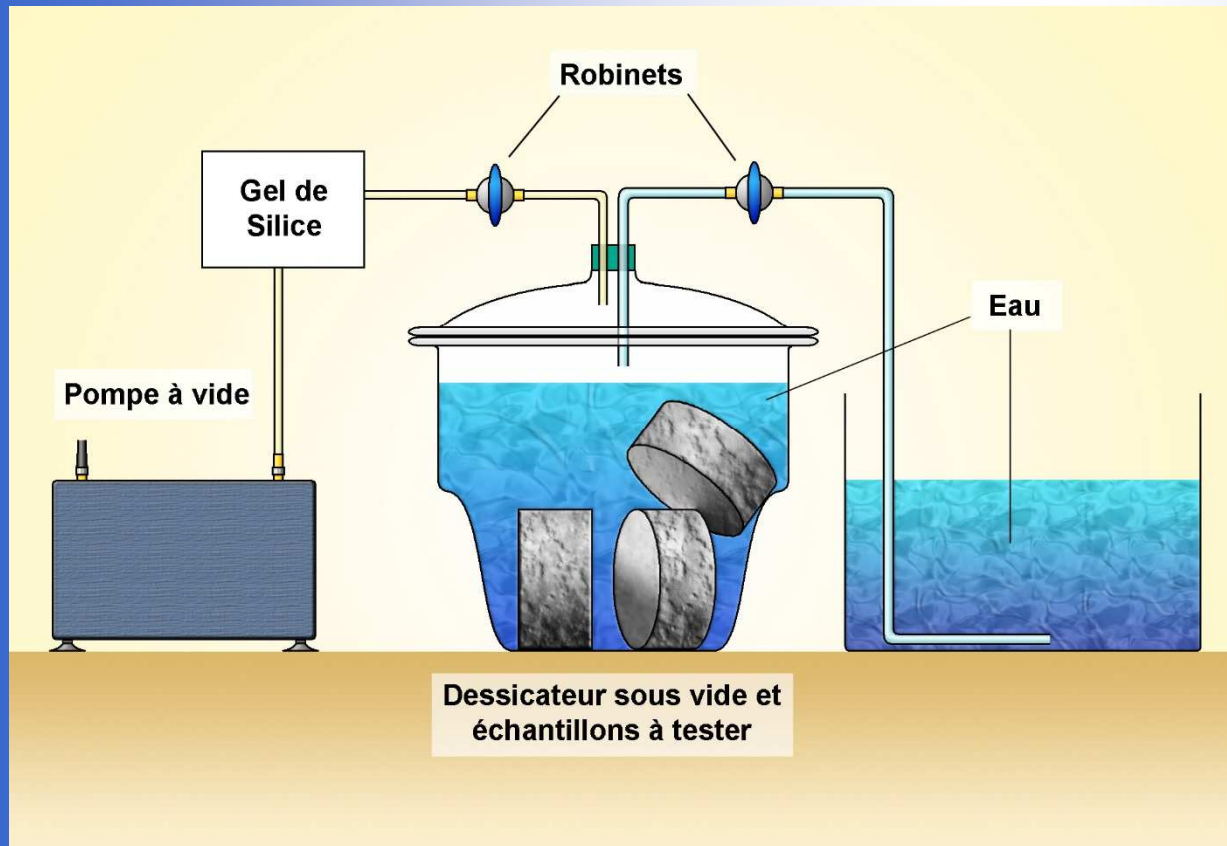
Bétons « XC4 / XF1 » :

- prélèvements pour **essais « d'information » à 28 jours (porosité accessible à l'eau et résistivité électrique)**: une mesure jusqu'à 100 m³ + une mesure par tranche de 100 m³ supplémentaire ou fraction restante => **6 séries d'essais pour le béton « appuis » et 8 séries d'essais pour le béton du hourdis,**
- prélèvements pour **essais « de contrôle » à 90 jours (porosité accessible à l'eau et perméabilité aux gaz)**: une mesure jusqu'à 500 m³ + une mesure par tranche de 500 m³ supplémentaire ou fraction restante => **2 séries d'essais pour le béton « appuis » et 2 séries d'essais pour le béton du hourdis.**



Recommandations LCPC – Porosité accessible à l'eau

Protocole : étape 1, saturation sous vide



- Mise sous vide (sans eau) à 0,025 bar ($\pm 0,005$ bar) pendant 4 h
- Injection d'eau en conservant le vide
- Maintenir le vide pendant 44 h \Rightarrow 68 h (*)

(*) Possibilité d'allonger la durée de saturation en fonction de la nature du béton et/ou de son état hydrique initial dans le cas des carottes (annexe 1 des Recommandations LCPC...)

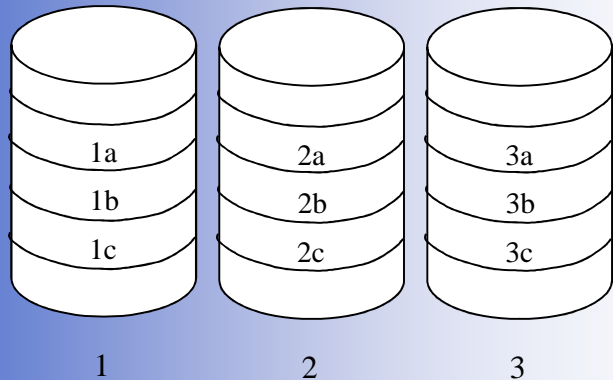
Remarque: NF P18-459 (mars 2010): 44 h de maintien du vide avec eau

Recommandations LCPC - Épreuve d'étude

Vis-à-vis du risque de corrosion des armatures

■ Mesure des indicateurs de durabilité (spécifiés au marché) **à 90j** :

□ Confection de 3 éprouvettes 11X22 (NF EN12390-2)



1a, 2a, 3a	Perméabilité au gaz (K_{gaz})
1b, 2b, 3b	Résistivité électrique (ρ) Coef. de diffusion des chlorures (D_{app})
1c, 2c, 3c	Porosité à l'eau (P_{eau})

□ Jugement de la conformité : moyenne de 3 résultats (3 éprouvettes distinctes) **à 90j**

$$K_{\text{gaz}} (90\text{j, épreuve d'étude}) \leq K_{\text{gaz}} (\text{marché})$$

$$D_{\text{app}} (90\text{j, épreuve d'étude}) \leq D_{\text{app}} (\text{marché})$$

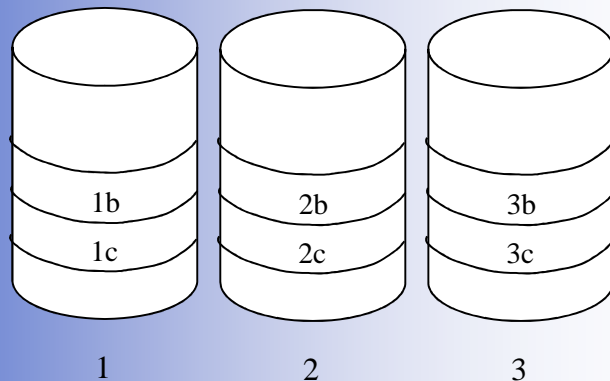
$$P_{\text{eau}} (90\text{j, épreuve d'étude}) \leq P_{\text{eau}} (\text{marché})$$

Recommandations LCPC - Épreuve d'étude

Vis-à-vis du risque de corrosion des armatures

■ En complément (perspective épreuve de convenance) :

□ Confection de 3 éprouvettes 11X22 (NF EN12390-2)



1b, 2b, 3b	Résistivité électrique (ρ)
1c, 2c, 3c	Porosité à l'eau (P_{eau})

□ Moyenne de 3 résultats (3 éprouvettes distinctes) à **28j**

- P_{eau} (28j, épreuve d'étude)

- ρ (28j, épreuve d'étude)



Validation de l'épreuve de convenance

Recommandations LCPC - Épreuve de convenance

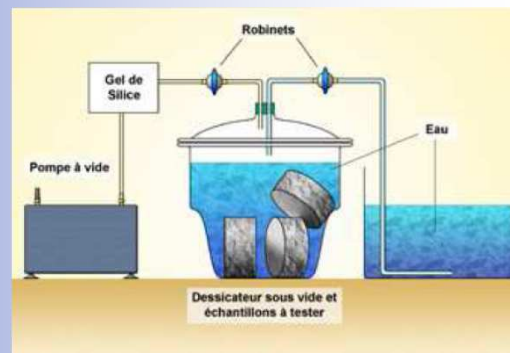
Vis-à-vis du risque de corrosion des armatures

■ L'épreuve de convenance se limite à des mesures de porosité (P_{eau}) et de résistivité (ρ) **à 28j** :

- ❑ Confection de 3 éprouvettes 11X22 (NF EN12390-2)
- ❑ Résultats comparés à ceux de l'épreuve d'étude à 28j

■ L'épreuve de convenance est reconnue probante si :

- ❑ P_{eau} (28j, épreuve convenance) < **1,1**. P_{eau} (28j, épreuve d'étude)
- ❑ ρ (28j, épreuve convenance) > **0,8**. ρ (28j, épreuve d'étude)



Porosité accessible à l'eau

Recommandations LCPC - Épreuve de contrôle

Vis-à-vis du risque de corrosion des armatures

■ Critères de jugement de la conformité :

□ A 28 jours :

- $P_{\text{eau}} (28\text{j ; contrôle}) \leq 1,1 \cdot P_{\text{eau}} (28\text{j ; épreuve étude})$
- $\rho (28\text{j, contrôle}) \geq 0,8 \cdot \rho (28\text{j, épreuve d'étude})$

□ A 90 jours :

- $P_{\text{eau}} (90\text{j ; contrôle}) \leq P_{\text{eau}} (\text{marché})$
- $K_{\text{gaz}} (90\text{j ; contrôle}) \leq K_{\text{gaz}} (\text{marché})$
- $D_{\text{app}} (90\text{j ; contrôle}) \leq D_{\text{app}} (\text{marché})$

■ + Contrôles des enrobages (Cmin)...

APB du viaduc de Volesvres

Rappel: approche performantielle non contractuelle

Pas d'épreuve d'étude spécifique aux essais performantiels vis à vis du risque de corrosion

Les premiers essais ont eu lieu à l'occasion des épreuves de convenance des bétons.

=> Par la suite, j'applique les critères de conformité de l'épreuve d'étude aux résultats d'essais obtenus lors des épreuves de convenance...

APB du viaduc de Volesvres - Formules de béton

Constituants	Pieux	Appuis	Hourdis	Longrines	
	«XC2/XA1 C30/37 S4 Dmax20 Cl 0,40»	«XC4/XF1 C30/37 S3 Dmax20 Cl 0,65 RSI»	«XC4/XF1 C40/50 S3 Dmax20 Cl 0,40 RSI»	«XC4/XF4/XD3 C35/45 S3 Dmax20 Cl 0,40»	
Sable 0/2 RL <u>Cognard Site de Chazey Gueugnon (ou 0/2 R – C2B – Port sud Epervans pour la centrale de Blanzÿ)</u>	345	365	340	/	
Sable 0/4 R <u>Cognard Site de Chazey Gueugnon (ou 0/4 R – C2B – Port sud Epervans pour la centrale de Blanzÿ)</u>	345	375	340	620	
Gravillon 4/12,5 LSC <u>Cognard Site de Chazey Gueugnon</u>	380	300	320	400	
Gravillon 10/20 LSC <u>Cognard Site de Chazey Gueugnon</u>	680	760	775	645	
CEMIIIA 52,5 L CE PM-ES-CP1 NF CALCIA <u>Rombas</u>	/	330	/	/	
CEMI 52,5 N CE CP2 PM-ES-CP2 NF LAFARGE <u>Val d'Azergues</u>	385	/	/	420	
CEMI 52,5 N CE CP2 NF CALCIA <u>Beffes</u>	/	/	350	/	
Filler <u>Bétocarb P2 OMYA/MEAC Gy</u>	/	50	55	/	
Plastiment 22S SIKA	2,65	2,30	2,30	/	
Sika <u>Viscocrete Tempo 12 SIKA</u>	2,12	2,12	4,24	/	
Plastiretard SIKA	0,94	0,235	0,35	/	
SPHRE – BASF – <u>Glenium SKY 537</u>	/	/	/	3,36	
AEA – BASF – Micro Air 104 dilué	/	/	/	0,25	
Eau efficace	185	155	146	143	
Eau efficace/Liant équivalent	0,48	0,47	0,42	0,34	

APB du viaduc de Volesvres - Formules de béton et quelques résultats

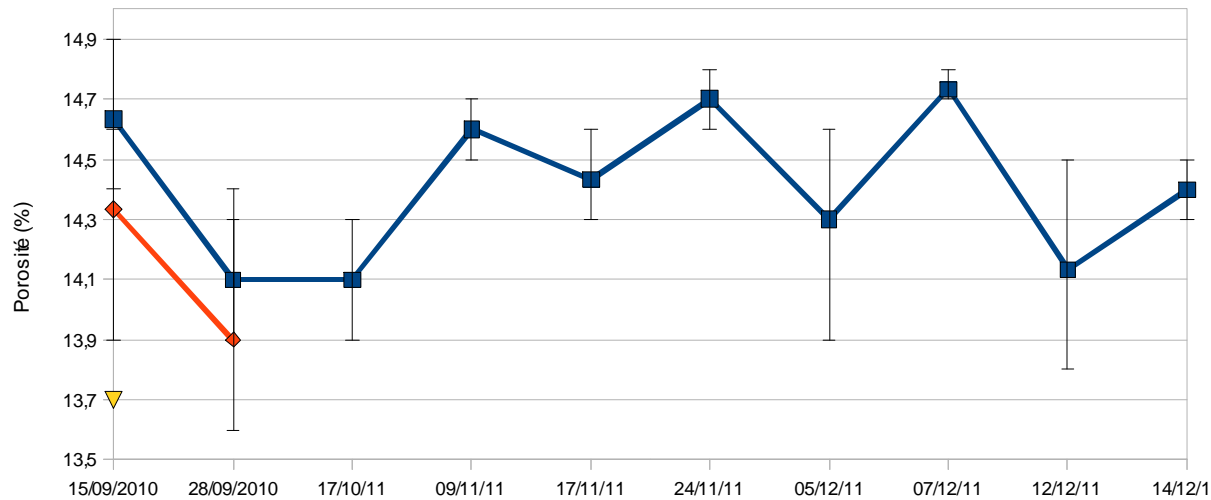
<u>Élément structurel</u>	Type de béton	<u>Eeff/Leq</u>
Appuis	C30/37 330 kg CEMIII/A 52,5 L CE PM ES CP1 NF	0,47
Hourdis	C40/50 350 kg CEMI 52,5 N CE CP2 NF	0,42
Longrines BN4 G+S	C35/45 420 kg CEMI 52,5 N CE PM ES CP2 NF	0,34

Zones des capteurs de corrosion	Date de coulage	Rc 28 jours (MPa)	Peau 28 jours (%) (*)	Peau 90 jours (%) (*)	Résistivité 28 jours (ohms x m)	Résistivité 90 jours (ohms x m)	K gaz (10 ⁻¹⁸ m ²)	Dapp (10-12 m2/s)
Fût de la pile P3	20/10/10	53,7	16	15,6	262	338	68	-
Mur garde-grève de la culée C0	13/12/10	61	15,4	15,5	256	310	68	-
Hourdis du tablier au droit de la culée C0	07/12/11	59,7	14,7	14,3	60	74	68	-
Hourdis du tablier au droit de la pile P3	12/12/11	65,7	14,1	13,6	63	79	64	-
Longrine témoin BN4	05/03/12	Convenance du 20/04/2011 : 42,7 – 54,7	-	13,6	-	61	338	11,9

APB du viaduc de Volesvres - Les résultats: exemple béton Hourdis

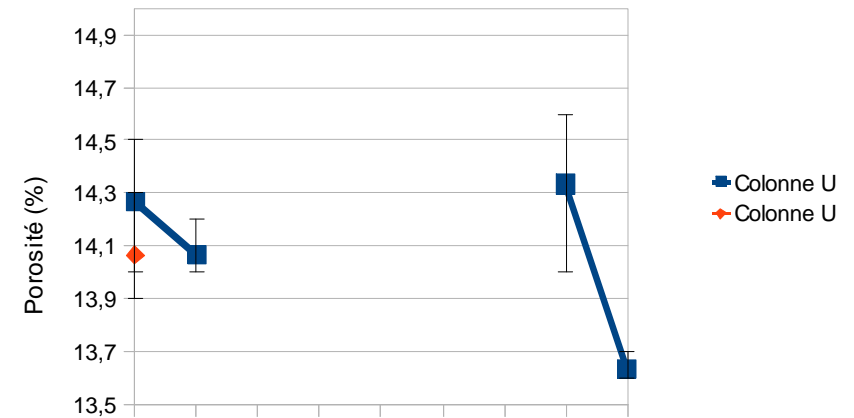
Voiesvres - Béton hourdis

Porosité accessible à l'eau à 28 jours



Voiesvres - Béton hourdis

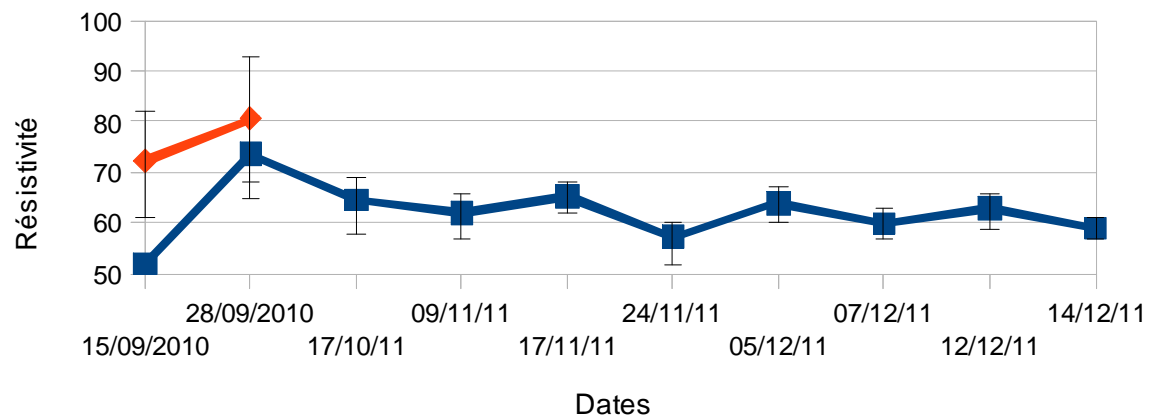
Porosité accessible à l'eau à 90 jours



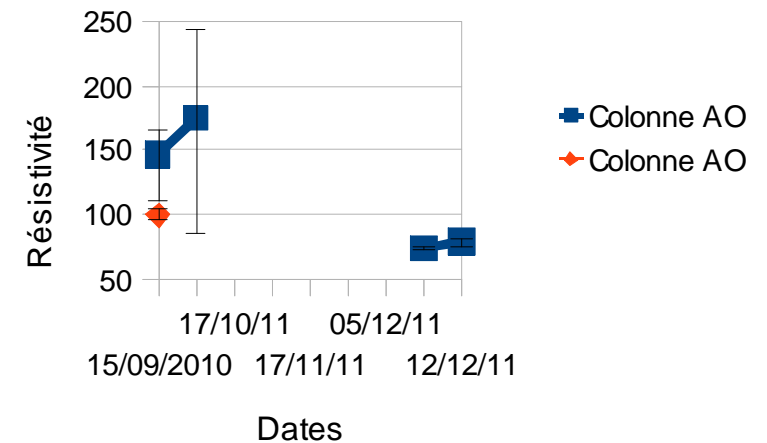
Voiesvres - Béton hourdis

Voiesvres - Béton hourdis

Résistivité à 28 jours



Résistivité à 90 jours



APB du viaduc de Volesvres – Exploitation des résultats

- Du point de vue de l'**approche prescriptive contractuelle**, les **3 premières formules de béton (pieux, appuis et hourdis)** sont conformes.
- Vis à vis de l'**approche performantielle** :

Les valeurs de porosité accessible à l'eau dépassent les seuils des Recommandations provisoires du LCPC (jusqu'à +1,3% en valeur absolue pour les bétons « CEM I » et jusqu'à +3,5% pour le béton « CEM III ») <=> conséquence vraisemblable du mode opératoire pratiqué pour ces mesures, avec une étape de saturation sous vide (25 mbars) du béton de durée de 72 heures (au lieu de 48 heures, voire moins).

Notes: Les seuils de porosité accessible à l'eau préconisés par les Recommandations provisoires du LCPC sont vraisemblablement cohérents avec le(s) **mode(s) opératoire(s) antérieurement pratiqué(s)**.

Par ailleurs ces seuils ont été définis sur la base de résultats obtenus essentiellement (voire exclusivement) avec des **ciments de type CEM I**.

APB du viaduc de Volesvres – Exploitation des résultats

En complément pour les **mesures de porosité accessible à l'eau** :

- les ordres de grandeur des porosités à 90 jours mesurées sur les 4 bétons sont « similaires », avec cependant des **valeurs plus importantes (environ + 1%) mesurées sur le béton « CEM III »** :

CEM I : de 13,6 % à 15,7 %

CEM III : de 14,5 % à 16,5 % ;

- la **dispersion** des résultats au sein d'un même prélèvement est **faible** (< 3% en valeur relative dans la quasi totalité des cas) ;
- les **écarts-types** des mesures réalisées par le DL Autun sont **faibles** (0,6% en valeur absolue maxi) ;
- les **écarts entre laboratoires** sur essais contradictoires sont la plupart du temps < 1% en valeur absolue (et dans tous les cas < 10% en valeur relative) ;
- la porosité accessible à l'eau baisse légèrement entre 28 et 90 jours (renvoie cependant à l'incertitude de l'essai).

APB du viaduc de Volesvres – Exploitation des résultats

Les valeurs de perméabilité au gaz satisfont aux seuils des Recommandations provisoires du LCPC.

En complément pour les **mesures de perméabilité au gaz** :

- les **écarts-types** des mesures réalisées par le DL Clermont-Ferrand sont de l'ordre de 15 à 20% en valeur relative.

Les critères de conformité à 28 jours (épreuve de convenance, épreuve de contrôle) sont toujours vérifiés.

APB du viaduc de Volesvres – Exploitation des résultats

En complément pour les **mesures de résistivité électrique** :

- la résistivité électrique est **plus faible pour les bétons CEM I** (< 200 voire à 100 ohm.m) **que pour le béton CEM III** (plutôt comprise entre 200 et 400 ohm.m) ;
- la **dispersion** des résultats au sein d'un même prélèvement est **assez importante** (généralement < 20% en valeur relative, mais parfois au delà...) ;
- les **écarts-types** des mesures réalisées par le DL Autun sont généralement de l'ordre de 10% en valeur relative (mais parfois au delà...) ;
- les **écarts entre laboratoires** sur essais contradictoires sont du même ordre de grandeur (10% en valeur relative), mais parfois au delà également... ;
- la résistivité électrique semble augmenter entre 28 et 90 jours (malgré l'importante dispersion constatée pour certains prélèvements).

APB du viaduc de Volesvres – Exploitation des résultats

Du point de vue de l'**approche prescriptive contractuelle** la **4^{ème} formule de béton (longrines XF4, XD3 G+S)** est conforme (*sauf critère « G »: Lbarre légèrement supérieur à la spécification pour l'épreuve de convenance*).

Vis à vis de l'**approche performantielle**, en considérant la classe d'exposition **XD3** associée à la classe XF4, **les valeurs de porosité accessible à l'eau, de perméabilité au gaz et de coefficient de diffusion apparent des ions Cl⁻ ne satisfont pas aux seuils des Recommandations provisoires du LCPC.**

Note: Ce constat doit faire **réfléchir aux conséquences des pratiques françaises actuelles de formulation des bétons « G+S » pour les éléments en béton armé exposés aux sels.**

En privilégiant la résistance au gel interne et à l'écaillage du matériau béton, on s'expose de façon importante au **risque de corrosion des armatures passives internes** (*bien que les règles de bonne conception conduisent à retenir des valeurs d'enrobage importantes, mais rarement et raisonnablement jamais supérieures à 5 cm...*).

APB du viaduc de Volesvres - Conclusions

- Les principes généraux des Recommandations provisoires du LCPC sont adaptés. Il est cependant **nécessaire d'accumuler de l'expérience**.
- **Modes opératoires d'essais fiabilisés : Recommandations LCPC + normes**
 - NF P18-459 Porosité accessible à l'eau (mars 2010)*
 - XP P18-463 Essai de perméabilité au gaz (novembre 2011)*
 - XP P18-462 Coefficient de diffusion apparent des ions chlorures (juin 2012)*
- Prise en compte des **incertitudes d'essais** (*semblent plus importantes pour les mesures de résistivité électrique et de K_{gaz} : dispersion maxi au sein d'un même prélèvement, éventuels critères sur valeurs individuelles et valeurs moyennes ?...*)
- Analyse des **seuils** proposés par le guide :
 - influence des modes opératoires d'essais (porosité accessible à l'eau : durée saturation sous vide) => **pris en compte dans le projet de révision du F65 du CCTG**
 - influence du type de ciment (CEM I / CEM III)?...
 - calage sur plus de résultats
 - recherche d'un optimum économique...

APB du viaduc de Volesvres - Conclusions

- Bonne adhésion des acteurs, **information préalable indispensable.**
- Une **nouvelle donne pour le couple « entreprise-BPE ».**
- Trouver collectivement des pistes pour favoriser l'**optimisation technico-économique et environnementale des formules de béton.**
- **Anticiper** pour assurer la gestion des délais sur chantier (*durée de murissement du béton de 90 jours préalable à la mesure des indicateurs de durabilité + durée de séchage...*) et développer le recours à des **formules régionales pré-qualifiées.**
- Développer le nombre de laboratoires capables de réaliser les essais.

APB du viaduc de Volesvres - Conclusions

L'Approche Performantielle des Bétons a été accompagnée par une instrumentation par **capteurs de corrosion** (de type électrochimique et fabriqués par le LNEC de Lisbonne) de certaines parties de l'ouvrage.

Le gestionnaire DIR Centre Est peut envisager une véritable gestion préventive de l'ouvrage vis à vis de la corrosion des armatures du BA (suivi des témoins de durabilité et suivi de l'instrumentation par capteurs de corrosion, modèles prédictifs) => programme de surveillance spécifique à établir.



Concevoir, construire et gérer des structures durables en béton

Approche performantielle et évolutions normatives

Merci de votre attention

