

Journées de restitution

www.perfdub.fr

Base de données PerfDuB et ses 42 bétons : Quels enseignements en tirer ?

*Véronique BOUTEILLER (Université Gustave Eiffel)
Jonathan MAI-NHU & Patrick ROUGEAU (Cerib)*

► Objectif du groupe de travail GT3

■ Définition des 42 bétons à étudier

- Classes d'exposition visées en priorité : XC4, XS2, XS3
- Objectifs : $\approx 50\%$ de bétons conformes aux classes d'expositions visées en priorité et 50% de bétons non conformes en termes de teneur en $L_{\text{éq}}$, de rapport $E_{\text{eff}}/L_{\text{éq}}$, de type de granulats

■ Exploitation de la base de données

- Contribution à la définition des critères de durabilité dans le FD P18-480 et quantification des valeurs seuils
- Autres méthodes :
 - Modélisation
 - Exploitation des données obtenues sur les ouvrages anciens

■ Etude de la variabilité spatiale et temporelle

- Contribution à la définition des marges de sécurité nécessaires en phase de qualification des bétons

■ Réalisation de corps d'épreuve (vieillessement naturel)



► Nature des liants

■ Large gamme de ciments

- CEM I 52,5 N
- CEM II/A-LL 42,5 R
- CEM II/A-S 52,5 N
- CEM III/A 42,5 N
- CEM III/A 52,5 L
- CEM V/A (S-V) 42,5 N

■ Large gamme d'additions avec des rapports « Addition / Addition + Ciment » volontairement retenus entre 0 et 65 %

- laitier de haut fourneau
- métakaolin
- cendres volantes
- fumée de silice
- addition siliceuse
- addition calcaire



► Granulats

	G1	G2	G3	G4	G5
Origine, type de matériau	Alluvionnaire silico-calcaire	Alluvionnaire silico-calcaire	Calcaire	Calcaire	Sable marin siliceux Gravillons : gneiss
Forme	Semi-concassée	Roulée pour le sable Gravillons : une coupure roulée et une coupure concassée	Concassée	Concassée	Roulée pour le sable Concassée pour les gravillons
Absorption d'eau	0/4 – 0,7% 4/11 – 1,0% 11/22 – 1,3%	2,7%	0,6%	0/4 – 4,0% 4/10 – 4,4% 10/20 – 4,0%	0/4 – 0,8% 4/11 – 0,4% 11/22 – 0,5%



► Guide de formulation des bétons

■ Protocole de conservation et de préparation des constituants

- Granulats : humidité résiduelle au moins supérieure à leur absorption plus 1 %.
- Caractérisation de la classe vraie à 28 jours des ciments

■ Protocole de malaxage défini

■ Écart maximal sur le rendement volumique fixé à $\pm 1,5$ %

■ Consistance visée selon la norme NF EN 12350-2

→ 180 ± 30 mm pendant 1 heure



► Essais réalisés

■ État frais

- affaissement selon NF EN 12350-2 à $t_{5 \text{ minutes}}$, t_{30} , t_{60} et t_{90}
- pour le BAP : étalement NF EN 12350-5 et stabilité du tamis à t_5 et t_{60}
- masse volumique selon NF EN 12350-6
- teneur en air selon NF EN 12350-7

■ État durci

- résistance à la compression selon NF EN 12390-3 à 24 heures, 7 jours, 28 jours et 90 jours
- propriétés de durabilité



	Propriétés	Cure humide	Cure sèche	Échéance d'essais (jours)
Pour tous les bétons	Perméabilité au gaz CEMBUREAU	X		28, 90
	Porosité accessible à l'eau	X		28, 90
	Absorption d'eau par capillarité	X	X	28, 90
	Absorption d'eau par immersion	X		28, 90
	Diffusion de l'oxygène	X		28, 90
	Migration des ions chlorure	X		28, 90
	Résistivité électrique	X		28, 90
	Carbonatation naturelle	X	X	90
	Carbonatation accélérée selon XP P18-458	X	X	90
	Carbonatation accélérée selon prNF EN 12390-12 (avec le préconditionnement PerfDuB)	X	X	90
Pour certains bétons	Perméabilité au gaz Torrent	X		28, 90
	Biodégradation	X		
	Lixiviation à pH constant	X		
	Attaque sulfatique externe	X		
	Coefficient de diffusion naturelle des ions chlorure	x		90

- **Cure humide** : cure standard (conservation dans l'eau ou dans une pièce avec une humidité relative supérieure ou égale à 95 %)
- **Cure sèche** : équivalent à la classe 2 de la norme NF EN 13670, cure humide jusqu'à ce que la résistance atteigne 35 % de $f_{ck,28}$ puis conservation à 20 °C et HR de laboratoire



► Nomenclature des bétons

■ Type ciment_Addition (Qté, type)_E_{eff}/L_f_{cm,28}

1_CEM I_0,59_43	15_CEM I_0,48_62	29_CEM I_S60_0,42_70
2_CEM I_V30_0,52_33	16_CEM II/A-S_0,5_50	30_CEM I_V30_0,35_64
3_CEM II/A-LL_0,6_41	17_CEM III/A_0,5_47	31_CEM III/A_0,4_67
4_CEM III/A_0,63_37	18_CEM I_V37_0,53_56	32_CEM I_S50_0,33_90
5_CEM I_S60_0,58_26	19_CEM II/A-S_0,5_60	33_CEM III/A_0,45_52
6_CEM I_L30_0,46_34	20_CEM II/A-S_0,5_59	34_CEM III/A_0,45_59
7_CEM I_L41_0,39_42	21_CEM I_L30_0,39_57	35_CEM V/A (S-V)_0,45_66
8_CEM II/A-LL_V30_0,53_31	22_CEM II/A-LL_0,49_57	36_CEM V/A (S-V)_0,45_49
9_CEM II/A-LL_S45_0,57_31	23_CEM II/A-S_0,49_46	37_CEM V/A (S-V)_0,45_56
10_CEM II/A-LL_0,61_32	24_CEM II/A-S_0,5_44	38_CEM I_D8_0,38_94
11_CEM II/A-LL_0,54_50	25_CEM I_0,5_50	39_CEM I_M20_0,43_62
12_CEM I_S60_0,55_46	26_CEM I_0,45_46	39b_CEM I_M20_0,42_66
13_CEM I_L30_0,42_39	27_CEM I_S50_0,43_68	40_CEM I_Qz30_0,49_28
14_CEM I_0,55_38	28_CEM I_0,45_66	41_CEM I_M20_0,35_93

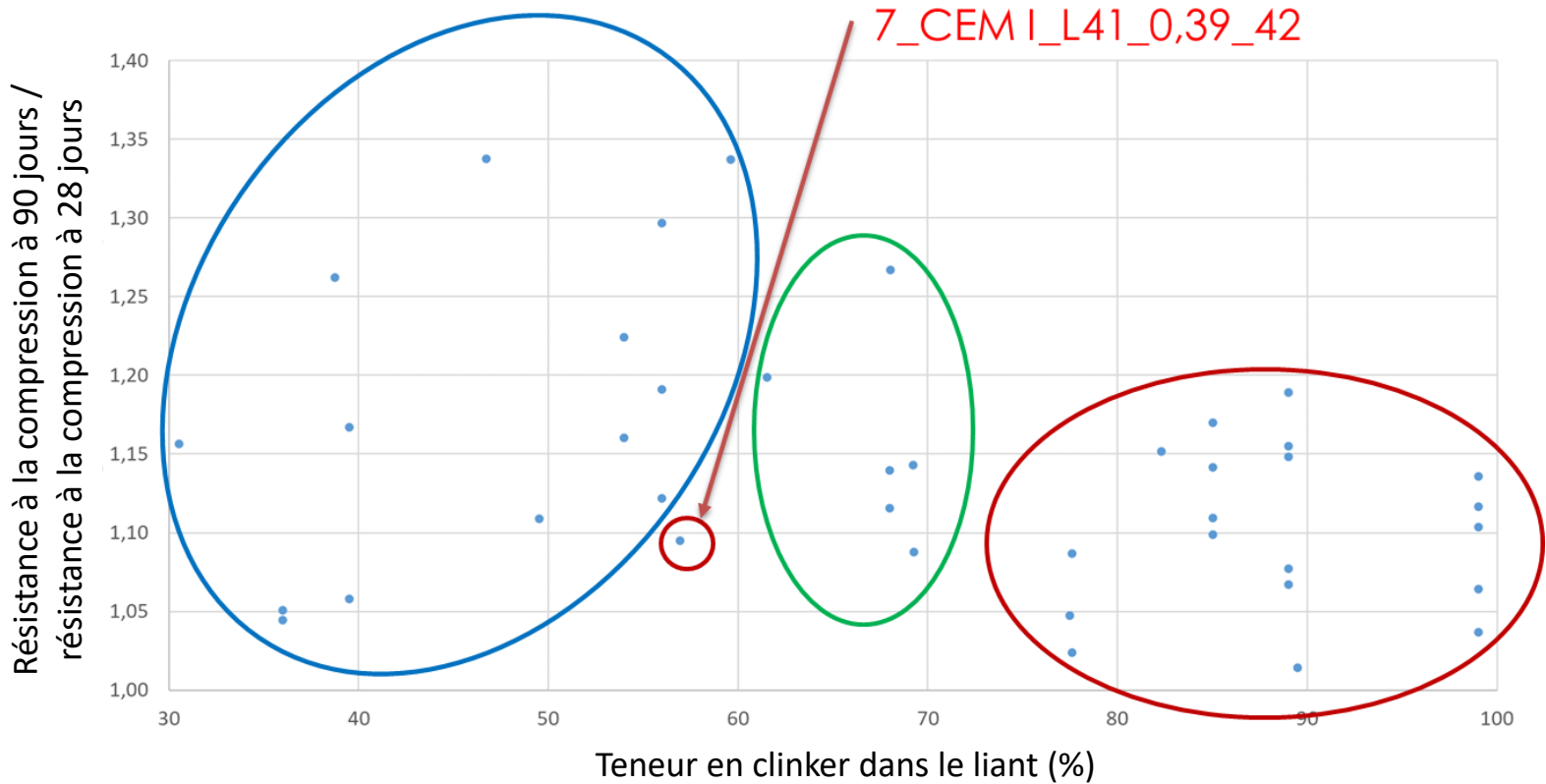


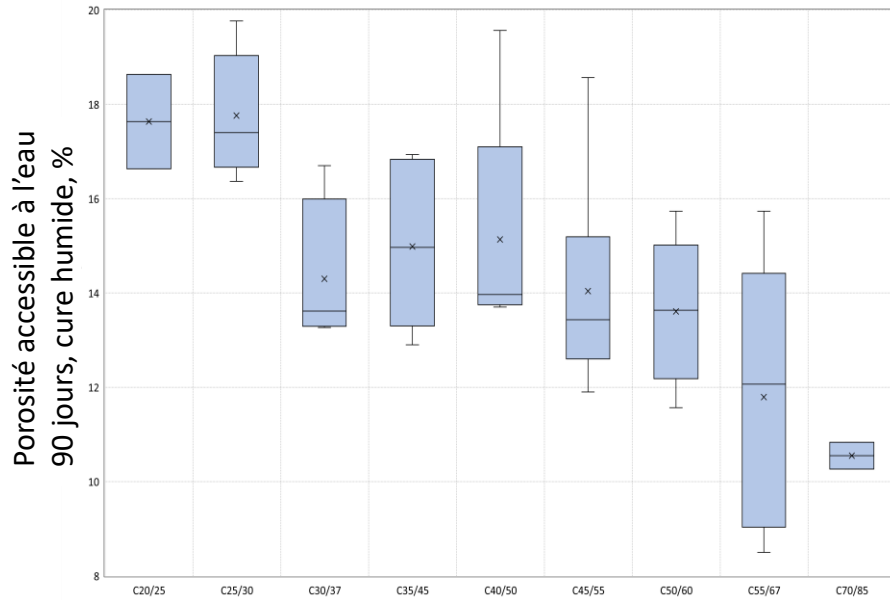
► **Définition de groupes de bétons – teneur en clinker**

Teneur en clinker dans le liant > 75%

Teneur en clinker dans le liant $60\% \geq X \geq 75\%$

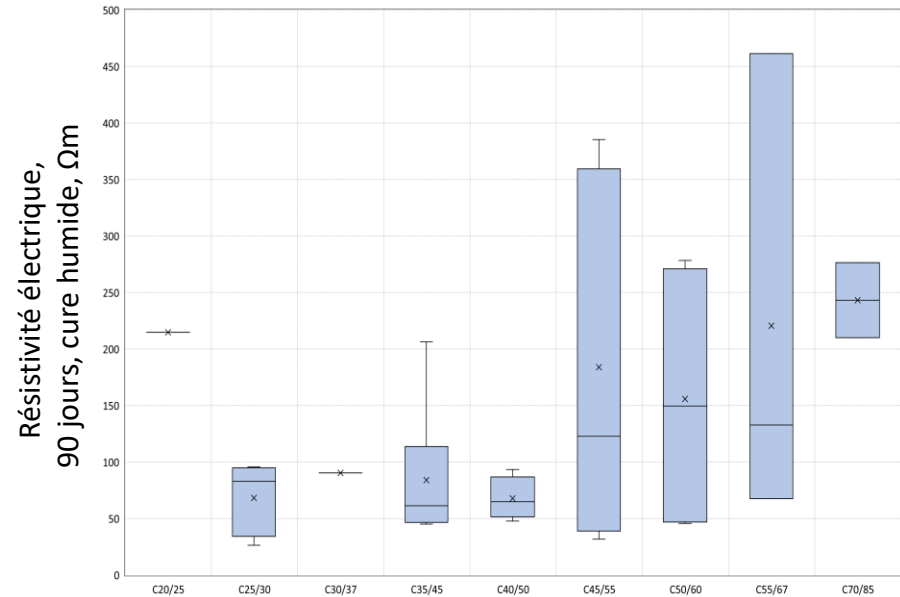
Teneur en clinker dans le liant < 60%



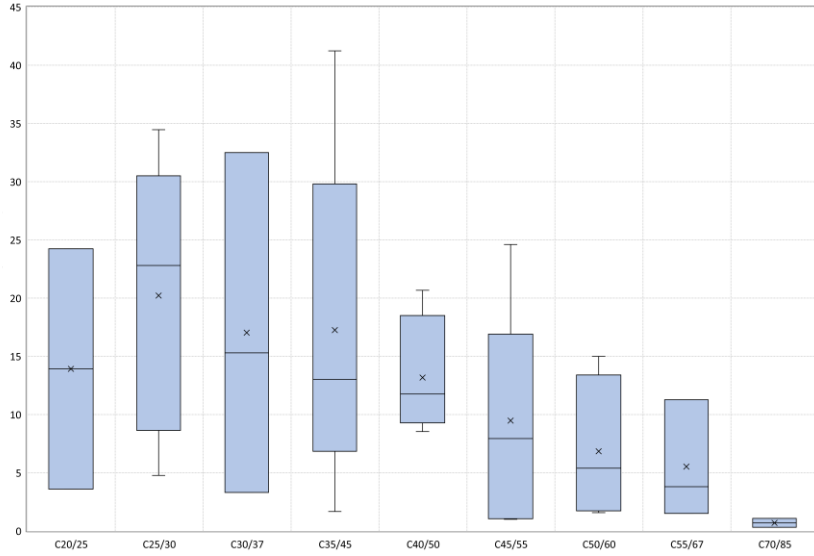


Porosité accessible à l'eau

Résistivité électrique



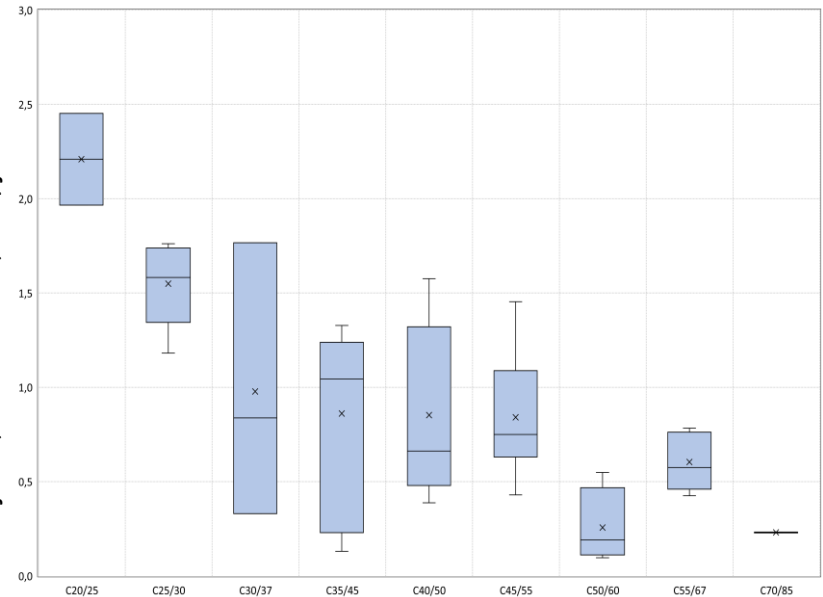
Coefficient de diffusion des ions chlorure,
 90 jours, cure humide, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$



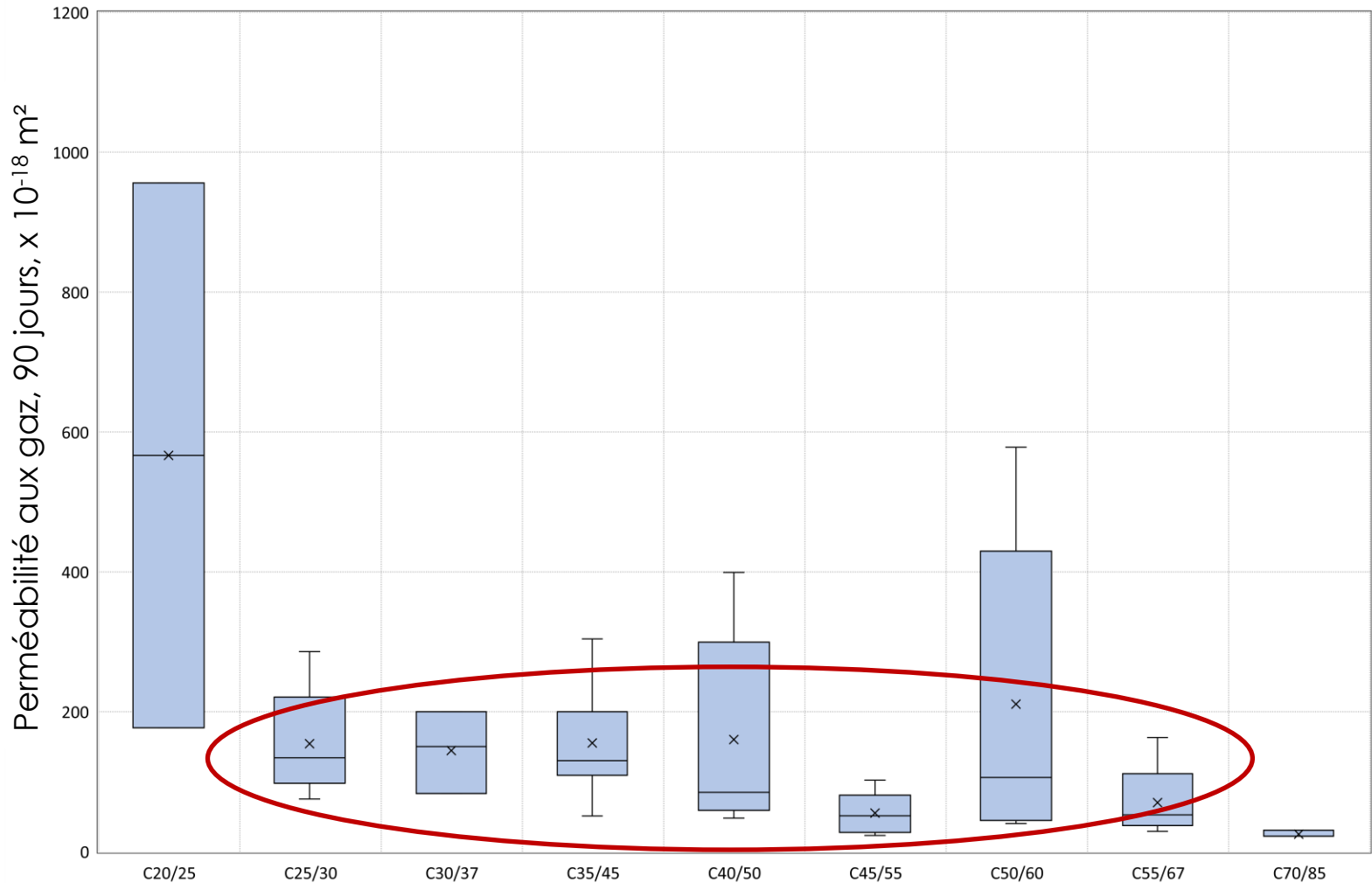
Coefficient de diffusion des ions chlorure

Vitesse de carbonatation accélérée

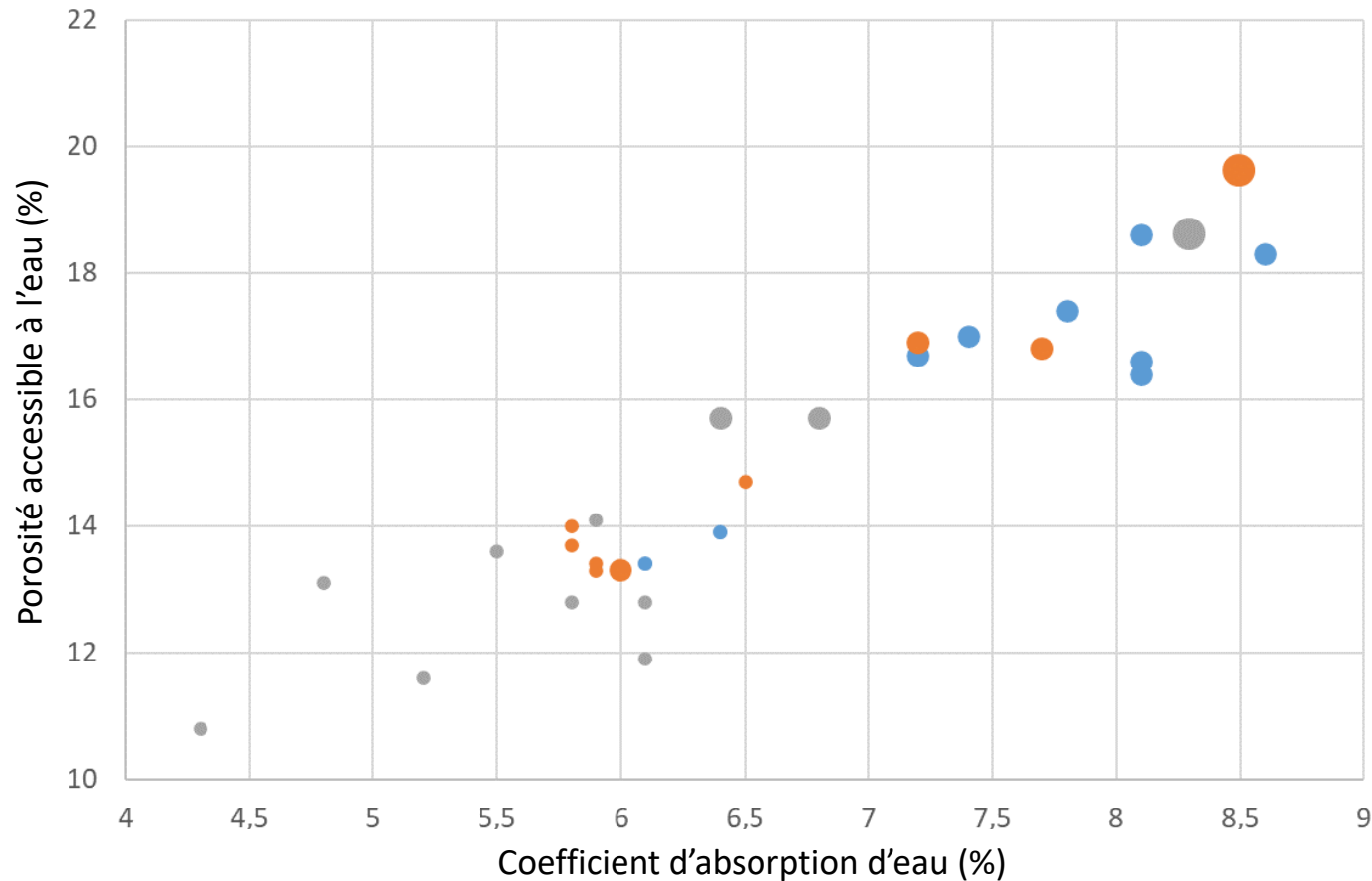
Vitesse de carbonatation accélérée, 90
 jours, cure humide, $\text{mm}/\text{jour}^{1/2}$



► Perméabilité aux gaz à 90 jours



► Porosité accessible à l'eau et absorption d'eau



Groupe A :
 C20/25, C25/30, C30/37

Groupe B :
 C35/45, C40/50, C45/55

Groupe C :
 C50/60, C55/67, C60/75,
 C80/95

- Représente 24 bétons incluant des granulats de faibles absorptions d'eau (< 1%)
- Représente 13 bétons incluant des granulats d'absorption d'eau moyenne (environ 2,5%)
- Représente 2 bétons incluant des granulats d'absorption d'eau élevée (environ 4%)

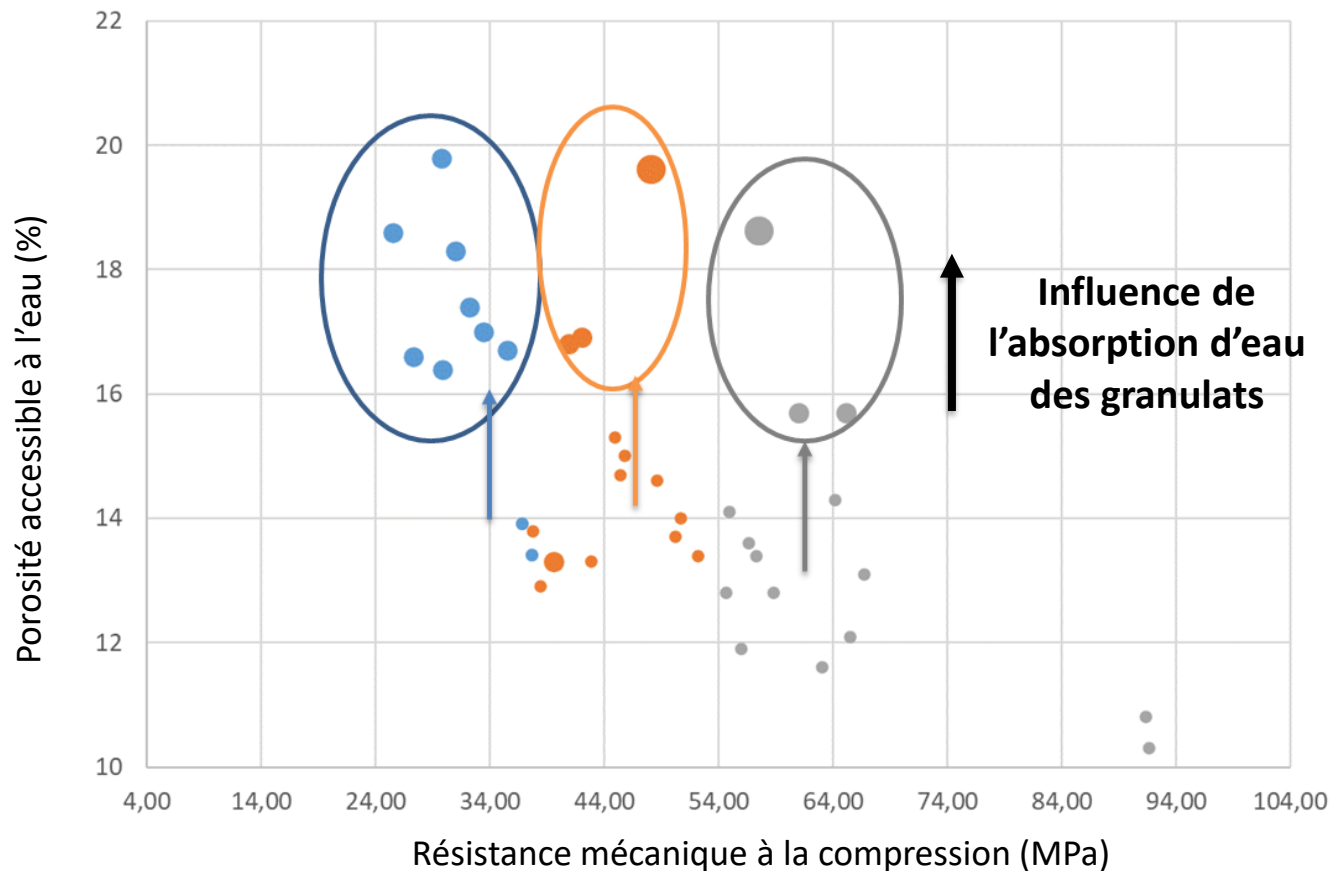


► Porosité accessible à l'eau et Influence de l'absorption d'eau des granulats

Groupe A :
 C20/25, C25/30, C30/37

Groupe B :
 C35/45, C40/50, C45/55

Groupe C :
 C50/60, C55/67, C60/75,
 C80/95



- Représente 24 bétons incluant des granulats de faibles absorptions d'eau (< 1%)
- Représente 13 bétons incluant des granulats d'absorption d'eau moyenne (environ 2,5%)
- Représente 2 bétons incluant des granulats d'absorption d'eau élevée (environ 4%)

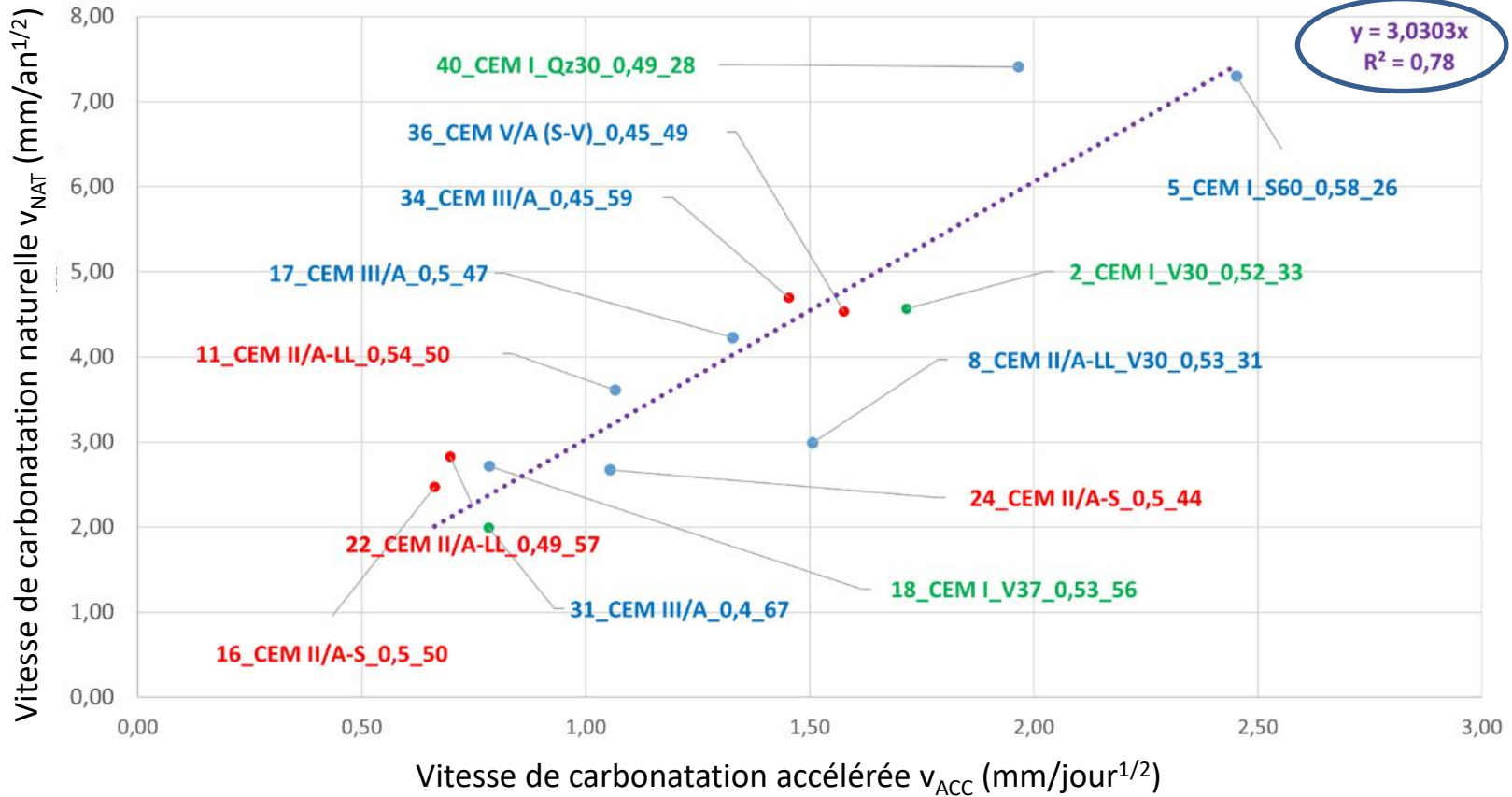


► Corrélation entre vitesse de carbonatation naturelle et accélérée

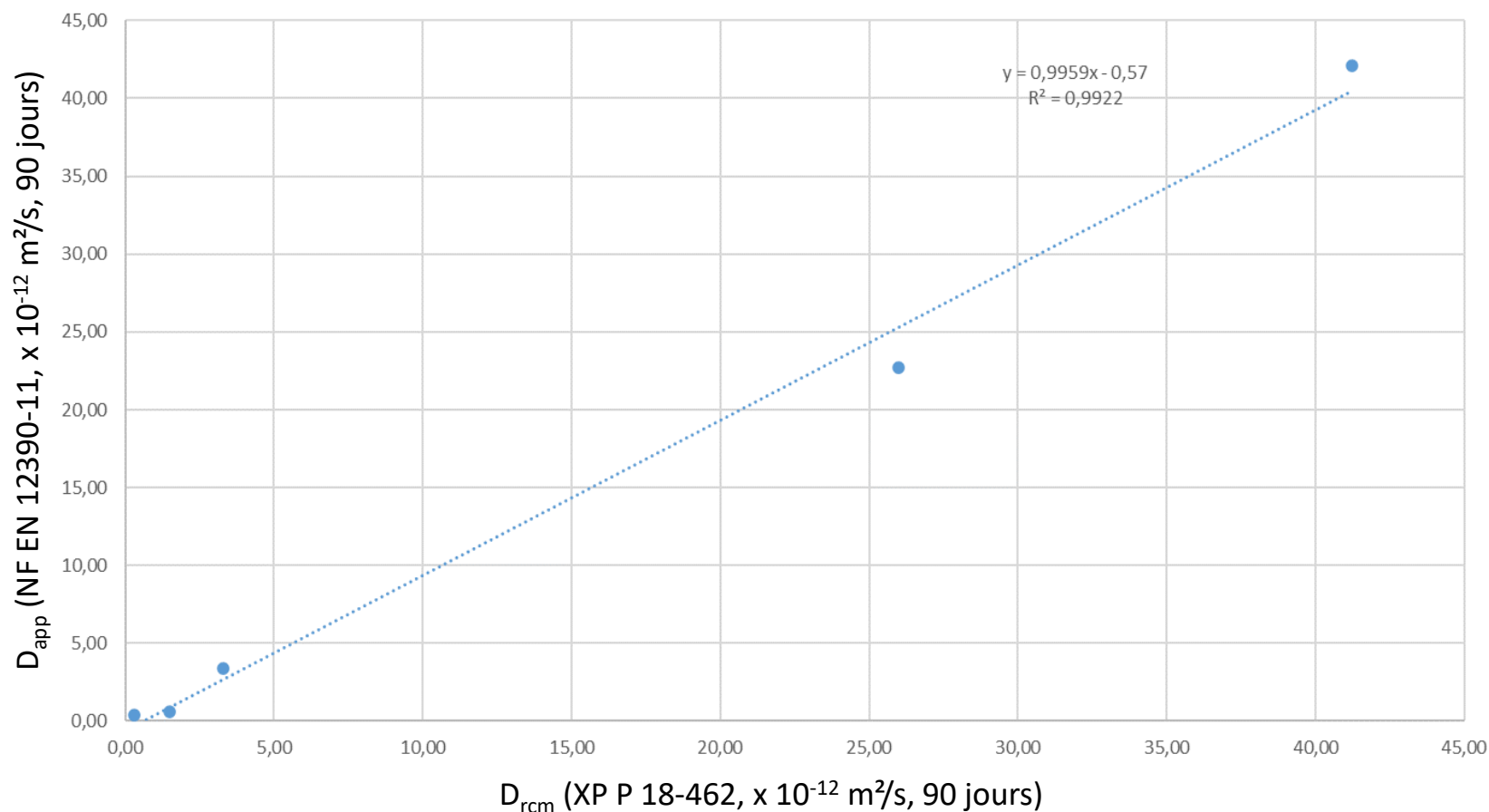
Teneur en clinker dans le liant > 75%

Teneur en clinker dans le liant $60\% \geq X \geq 75\%$

Teneur en clinker dans le liant < 60%



► **Coefficient de diffusion des ions chlorures : diffusion naturelle (D_{app}) vs diffusion accélérée sous champ électrique (D_{rcm})**



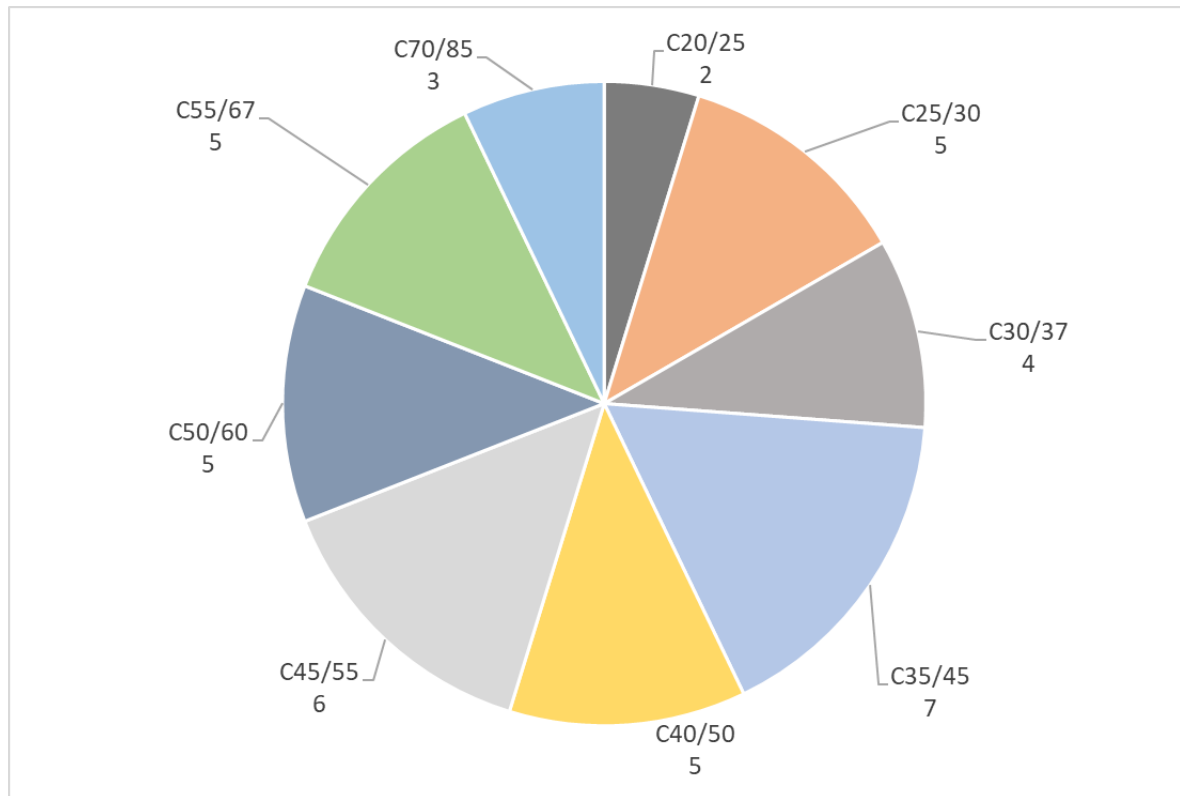
► Définition des critères de performance

- **Exploitation de la base de données des 42 bétons**
- Modélisation
- Exploitation des données obtenues sur les ouvrages anciens



► Méthodologie : définition des bétons retenus pour chaque classe d'exposition

- Répartition des bétons par classe de résistance mécanique



- ▶ **Méthodologie : définition des bétons retenus pour chaque classe d'exposition**
 - **Objectif** : définir des critères de performances en fonction des classes d'exposition, en considérant les bétons conformes aux exigences liées à ces environnements
 - **Population d'étude proposée** : bétons conformes à la classe d'exposition étudiée et dont la classe de résistance mécanique est au maximum supérieure à la classe minimale requise de :
 - 2 classes pour les bétons conformes à la norme NF EN 206/CN (Durée d'utilisation de projet de 50 ans)
 - 3 classes pour les bétons conformes au Fascicule 65 (Durée d'utilisation de projet de 100 ans)



► Méthodologie : définition des bétons retenus pour chaque classe d'exposition

- **Exemple** : Classe d'exposition XC2, durée de vie 50 ans, extrait NA.F.1 de la NF EN 206/CN

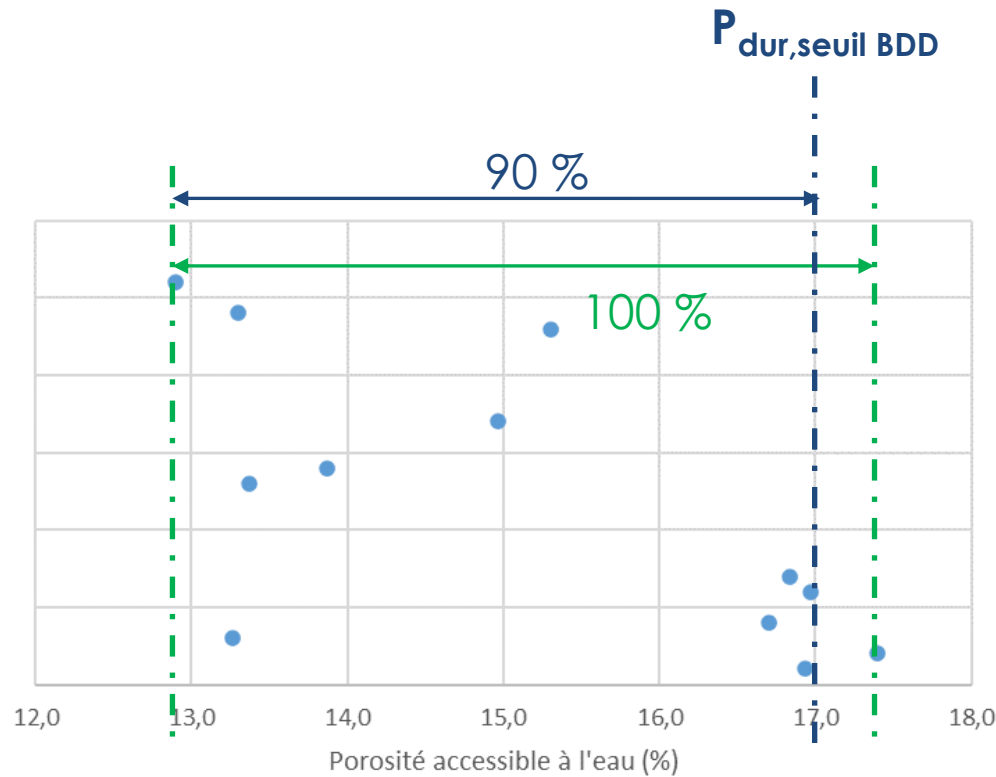
	X0	XC1	XC2
Rapport $E_{eff}/liant$ éq maximal ^{c)}	-	0,65	0,65
Classe de résistance minimale	-	C20/25	C20/25
Teneur mini en liant éq (kg/m^3) ^{c)} d)	150	260	260
Teneur minimale en air (%)	-	-	-
Essai(s) de performances ^{m)}	-	-	-

Les bétons retenus sont tous des bétons dont la composition respecte les valeurs seuils du tableau NA.F.1 de la NF EN 206/CN, et dont la classe de résistance de résistance mécanique correspond à **C20/25**, **C25/30** et **C30/37**.



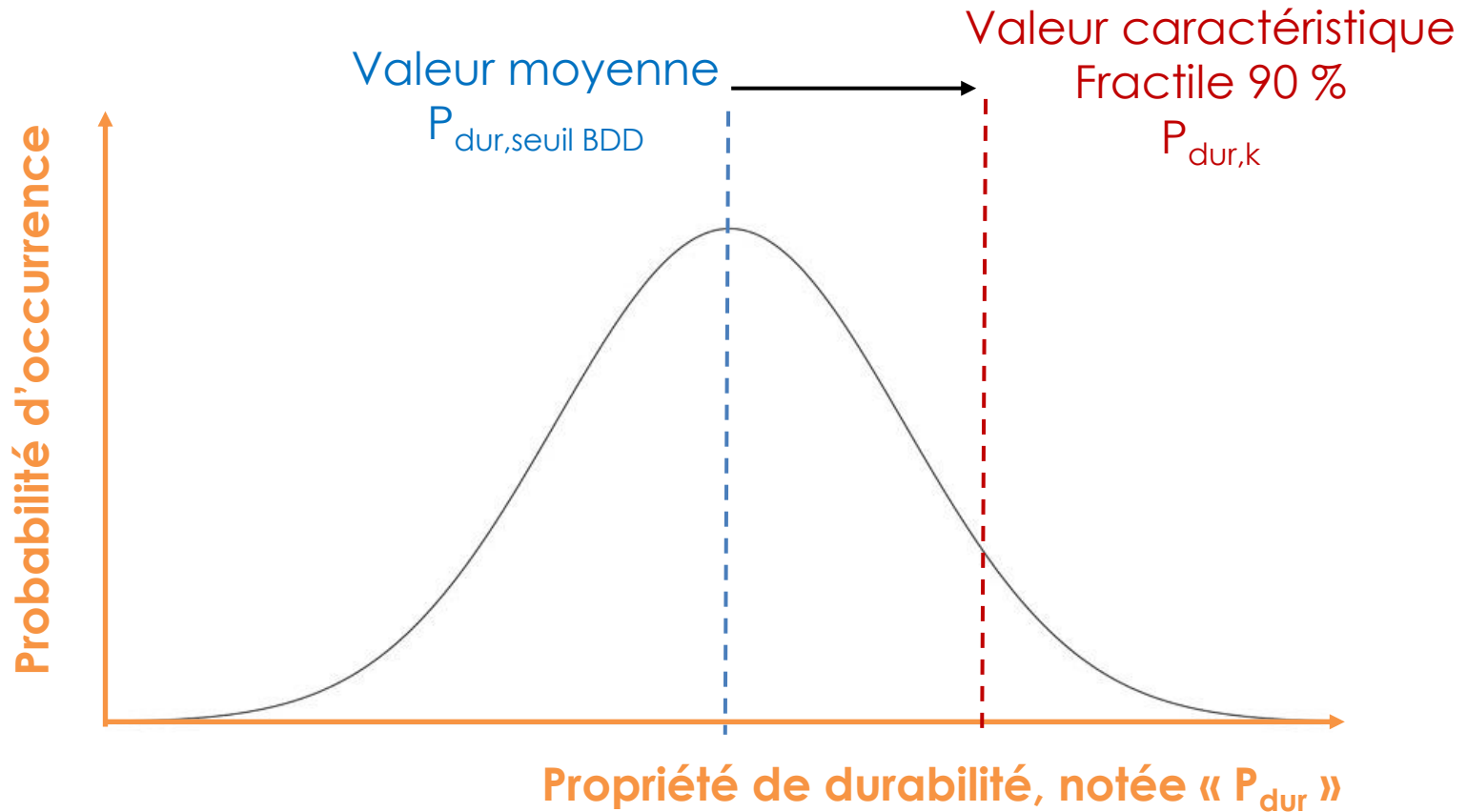
► Méthodologie : définition du seuil moyen

- Pour chaque classe d'exposition, détermination d'une valeur seuil à partir des résultats (moyennes) obtenus pour les bétons considérés, notée $P_{dur,seuil\ BDD}$



► **Méthodologie : définition de la valeur caractéristique**

$$P_{dur,k} = P_{dur,seuil\ BDD} + 1,28 \sigma$$



► Étude de la variabilité

- **Étude paramétrique** : réalisée en laboratoire (variation des paramètres de composition)
- **Étude de variabilité temporelle** : réalisée sur 1 an de production en centrale à béton (variation des paramètres des matériaux et des conditions extérieures)
- **Étude de variabilité in situ** (variabilité spatiale + étude de l'influence de la cure) : réalisée sur maquette spécifique (variation des paramètres de cure et de position sur le voile d'essai)



► Méthodologie : Coefficients de variation retenus pour les grandeurs associées à la durabilité

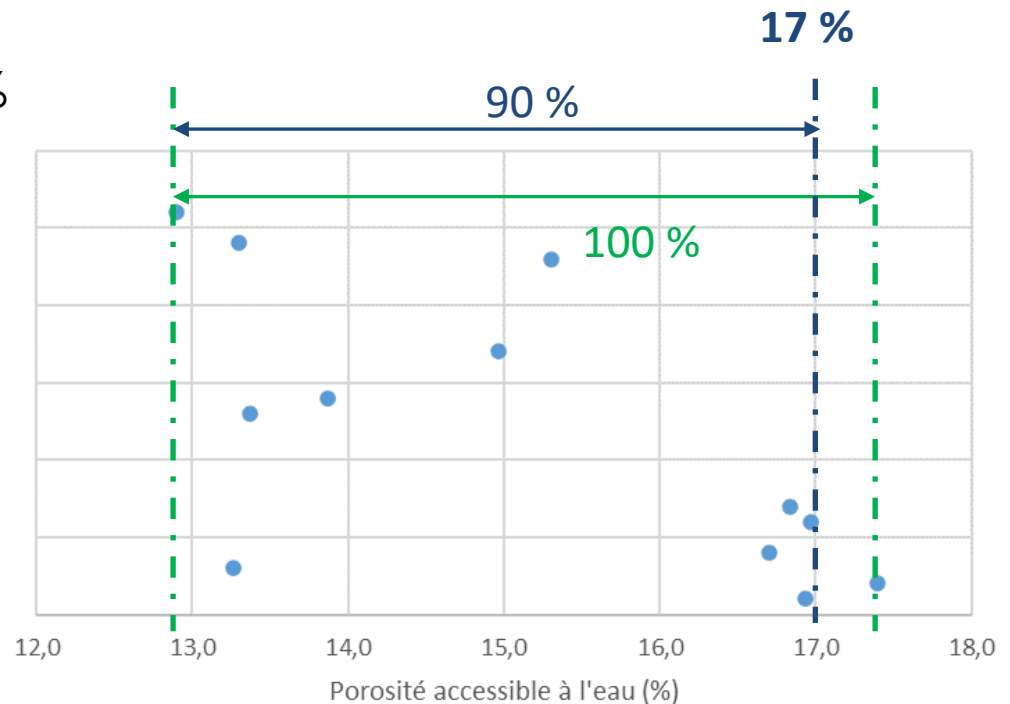
- Valeurs issues de plusieurs retours d'expériences sur ouvrages (bétons de gammes de résistance C30/37 à C50/60)

Essais	Valeur forfaitaire proposée (%)
Résistance mécanique à la compression (pour référence)	10
Porosité accessible à l'eau	6
Migration des ions chlorure en régime non stationnaire	25
Résistivité électrique	20
Perméabilité au gaz	30
Vitesse de carbonatation accélérée	25

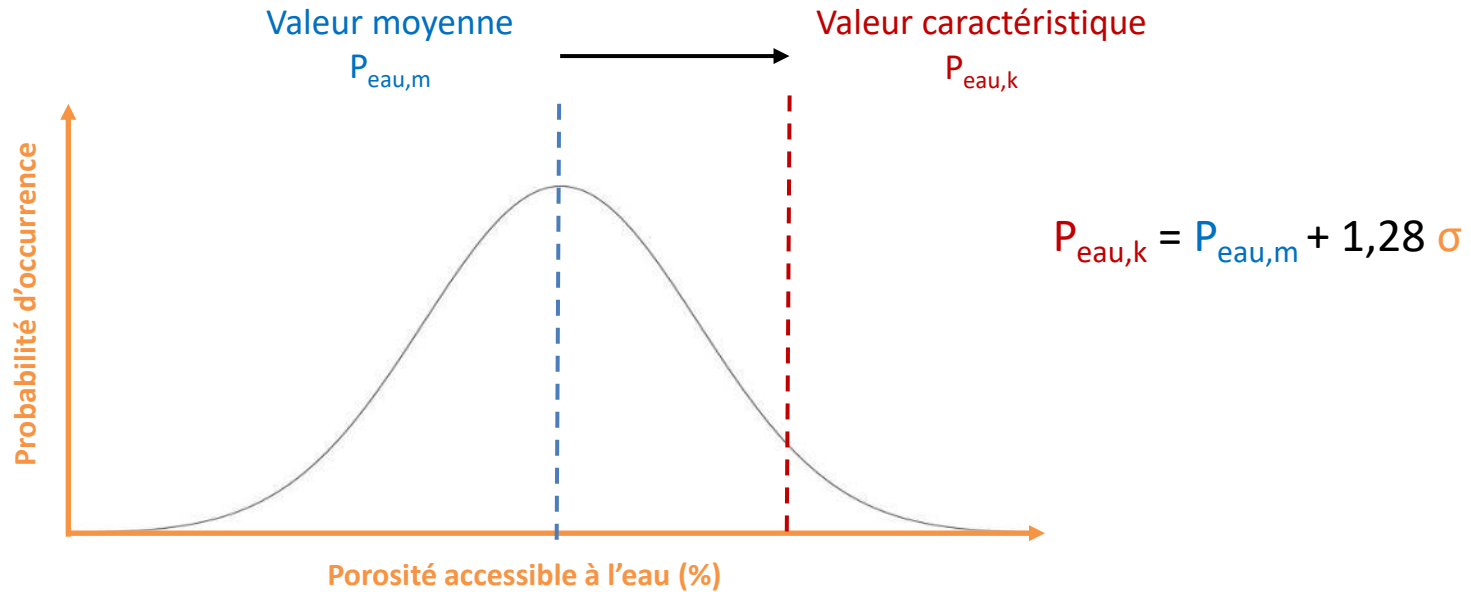


► Exemple : porosité accessible à l'eau

- Classes d'exposition : XC3 / XC4
- Durée de vie : 50 ans
- Nombre de bétons sélectionnés : 12/42 (C25/30, C30/37, C35/45)
- Porosité minimale : 12,9 %
- Porosité maximale : 17,4 %



► **Exemple : porosité accessible à l'eau**



- Valeur seuil moyenne : **17 %**
- Coefficient de variation : **6 %**
- Valeur caractéristique en considérant un fractile de 90 % : $P_{eau,k} = \mathbf{18,3 \%}$



► Synthèse des critères de performance obtenus via l'exploitation de la base de données des 42 bétons

■ Chlorures

Classe d'exposition	CLASSES DE CHLORURES XS-XD - DUP 50 ans	
	Critères de qualification performantielle (valeurs caractéristiques à 90%)	
	Modulation selon le facteur de vieillissement	$D_{rcm,90 \text{ jours}} \text{ (} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s)}$
XS1	Contribution de la modélisation	33
XS2		33
XS3		17
XD1		46
XD2		33
XD3		17

Classe d'exposition	CLASSES DE CHLORURES XS-XD - DUP 100 ans	
	Critères de qualification performantielle (valeurs caractéristiques à 90%)	
	Modulation selon le facteur de vieillissement	$D_{rcm,90 \text{ jours}} \text{ (} \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s)}$
XS1	Contribution de la modélisation	18
XS2		18
XS3		10
XD1		18
XD2		18
XD3		10



► Synthèse des critères de performance obtenus via l'exploitation de la base de données des 42 bétons

■ Carbonatation

CLASSES DE CARBONATATION XC - DUP 50 ans			
Critères de qualification performantielle (valeurs caractéristiques à 90%)			Pour info : carbonatation naturelle protocole PN
Classe d'exposition	Modulation selon classe de résistivité à 90j ($\Omega.m$)	Option 1	
		Vitesse de carbonatation accélérée ($mm/j^{0,5}$)	
XC1	Contribution de la modélisation	2,4	9,3
XC2		2,4	9,3
XC3		2,2	6,0
XC4		2,2	6,0

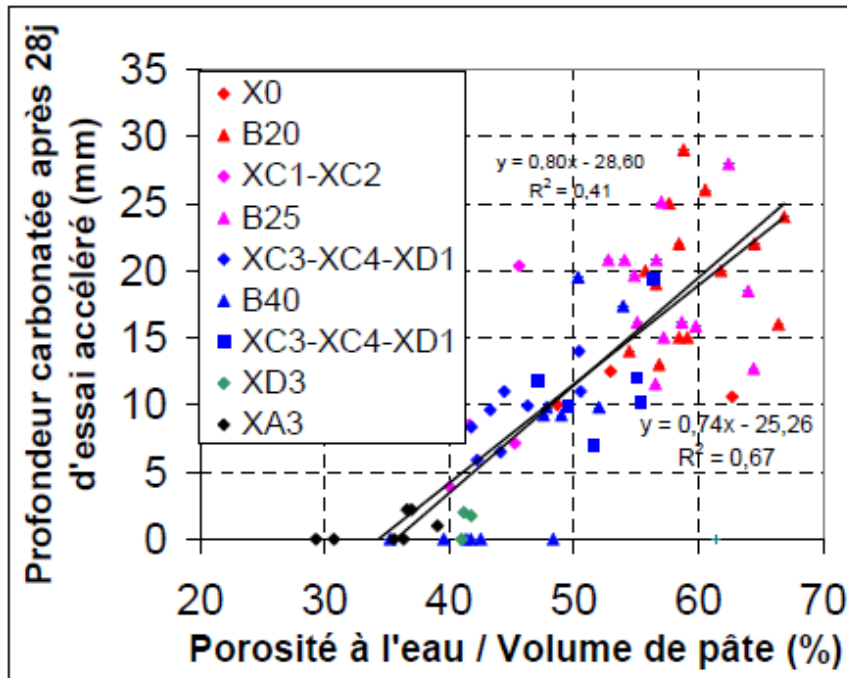
CLASSES DE CARBONATATION XC - DUP 100 ans			
Critères de qualification performantielle (valeurs caractéristiques à 90%)			Pour info : carbonatation naturelle protocole PN
Classe d'exposition	Modulation selon classe de résistivité à 90j ($\Omega.m$)	Option 1	
		Vitesse de carbonatation accélérée ($mm/j^{0,5}$)	
XC1	Contribution de la modélisation	2,2	6,0
XC2		2,2	6,0
XC3		1,7	5,2
XC4		1,7	5,2



► Option 2 : Porosité accessible à l'eau, volume de pâte

■ Carbonatation : Intérêt de la porosité ramenée au volume de pâte :

Thèse de EMMANUEL ROZIERE, Etude de la durabilité des bétons par une approche performantielle, 2007



Profondeur carbonatée en fonction de la porosité (%) rapportée au volume de pâte (%) (ie fraction volumique de pâte), du mélange granulaire et des spécifications de la norme selon les classes d'exposition.

Mélanges granulaires étudiés : pas de différences significatives de comportement.

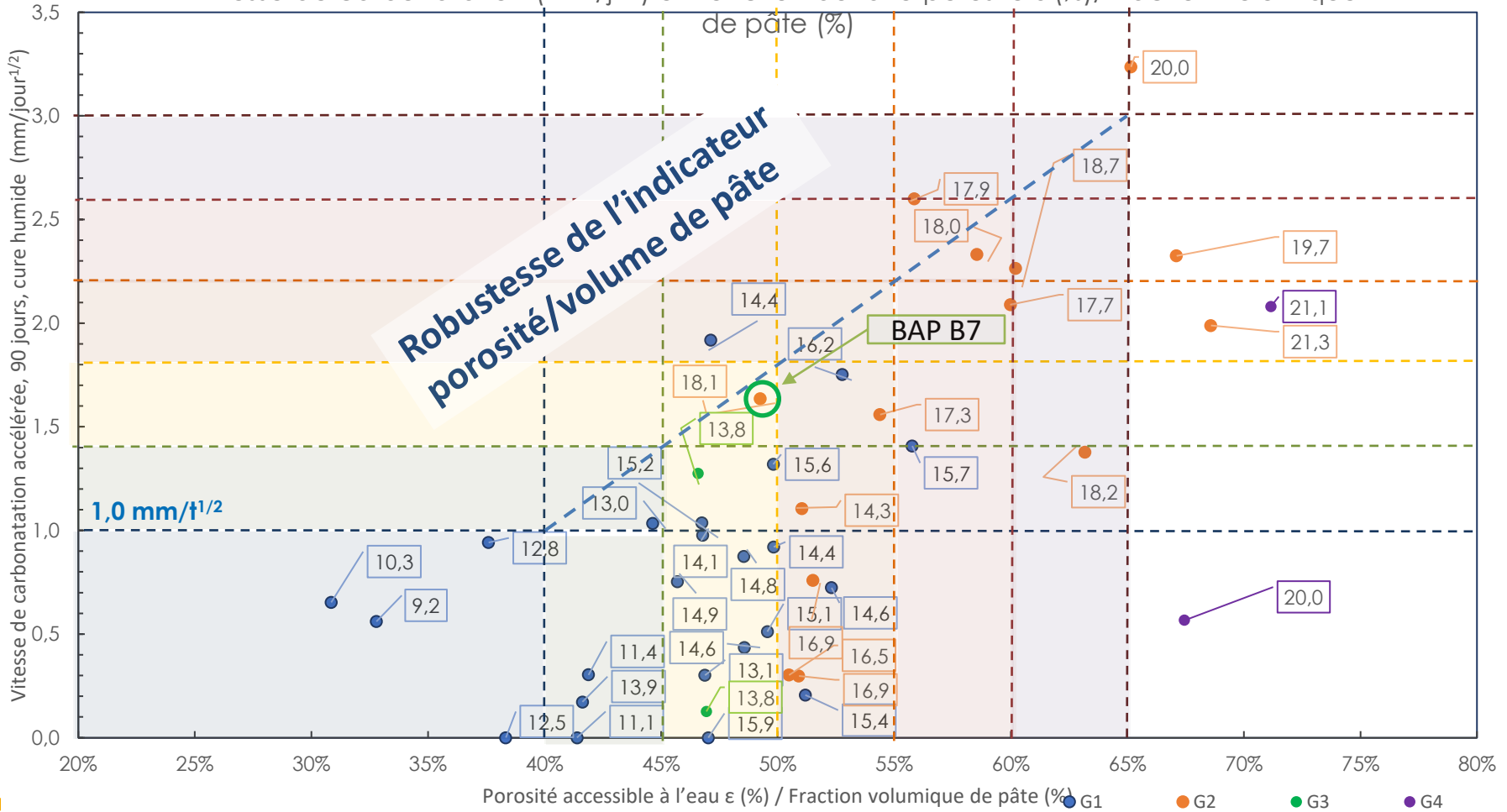
Tendance générale d'augmentation de la profondeur carbonatée avec la porosité, mais pour une valeur de porosité donnée : forte dispersion des valeurs de profondeurs carbonatées.



► **Option 2 : Porosité accessible à l'eau, volume de pâte**

■ **Carbonatation**

Vitesse de carbonatation ($\text{mm}/\text{j}^{1/2}$) en fonction du ratio porosité ϵ (%) / fraction volumique de pâte (%)



► Option 2 : Porosité accessible à l'eau, volume de pâte

■ Carbonatation

CLASSES DE CARBONATATION XC			
Critères de qualification performantielle (valeurs caractéristiques à 90%)			
Option 1	Option 2	Pour information	Pour mémoire :
Vitesse de carbonatation accélérée [mm/j ^{0,5}]	Porosité à l'eau (%) / Volume de pâte (%) [%]	Porosité à l'eau pour un béton standard à 30% de volume de pâte [%]	Seuils du fascicule 65 potentiellement correspondants [%]
1,0	40	12	13,5
1,4	45	13,5	14
1,8	50	15	14,5
2,2	55	16,5	15
2,6	60	18	15,5
3,0	65	19,5	

Exemple : Validation d'un béton XC4 contenant 30 % de volume de pâte

- Option 1 → Vitesse de carbonatation accélérée $\leq 1,8 \text{ mm/j}^{0,5}$

Ou

- Option 2 → Porosité/Volume de pâte $\leq 50 \%$

(soit porosité à l'eau $\leq 15 \%$ ou $\leq 12 \%$ si réduction de 2 classes)

Pour mémoire : 13,5 % F65



► Conclusions - Perspectives

Base de données du PN Perfdub :

- Campagne expérimentale sur un large panel de bétons (42) représentatifs d'applications structurales dans le bâtiment et le génie civil
- Clarification des liens entre les paramètres de composition des bétons et leurs propriétés de durabilité
- Référence en France et à l'échelon européen
- Mise au point d'une méthodologie robuste pour la quantification des valeurs seuils de durabilité incluant la variabilité
- Contribution majeure, avec la modélisation et le retour sur ouvrages anciens, à la détermination des critères de durabilité et la définition des valeurs seuil du FD P18-480



► Etude de la vitesse de corrosion en fonction de la formulation du béton et de son environnement

- **Partenaires : Vinci (F. Cussigh), Univ. Eiffel (V. Bouteiller), LaSie (P. Turcry), Cerib (J.Mai-Nhu)**
- **Objectifs : (suite des projets ANR APLET et MODEVIE)**
 - Evaluer la cinétique de corrosion ET la fissuration
 - Simuler, modéliser et prédire
- **Etude : 600 prismes en béton armé (échelle cm)**
 - 3 bétons : B01, B04 et B31
 - Contaminations : ions chlorure ou carbonatation
 - Expositions : contrôlées (Labo), extérieures et milieu maritime
 - Evolution dans le temps



► **Ions chlorures**

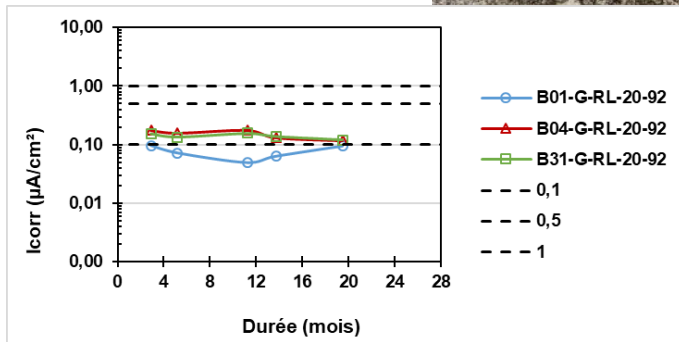
Univ Eiffel (1 020 essais)

Prismes

LaSie (216 essais)

► **Carbonatation**

CERIB (316 essais)



► Suivi de la durabilité du béton et de la corrosion des armatures de bétons armés en conditions de vieillissement naturel en environnement urbain ou marin

- **Partenaires : Cerib (J.Mai-Nhu), Univ. Eiffel (V. Bouteiller), LRMH (E. Marie-Victoire, M. Bouichou), LaSic (P. Turcry) et Eqiom (M. Gerony-Candau)**
- **Objectifs : (suite des projets APPLET, APOS et CANOPEE)**
 - Etudier la durabilité du béton d'enrobage
 - Etudier la cinétique de corrosion des armatures (Contrôles Non Destructifs et capteurs) et de la fissuration induite du béton d'enrobage
 - Améliorer les outils de diagnostic de la corrosion des armatures : comparaison entre contrôles non destructifs ponctuels et monitoring par capteurs noyés dans le béton (4 types de capteurs) + centrale d'acquisition interrogeable à distance
 - Corps d'épreuve (CE) : 28 murs en béton armé
 - 11 Bétons : B01, B02, B04, B05, B07, B31, B36, B37, B38, B40 et B41
 - Plusieurs types d'armatures (ronds lisses et HA)
 - 4 sites d'expositions :
 - » 11 CE Epernon (XC4) et 11 CE La Rochelle (XS3) ;
 - » CE instrumentés : 3 à Marne-la-Vallée (XC4) et 3 à Eqiom la Rochelle (XS3e)



HA20

Enrobage de 20 mm

Corps d'Epreuve : 28 murs en BA

- Ancre de levage
- Cage d'armature externe
- HA10 Fe500
- Rond lisse Fe235

Enrobage de 10 mm

RL20

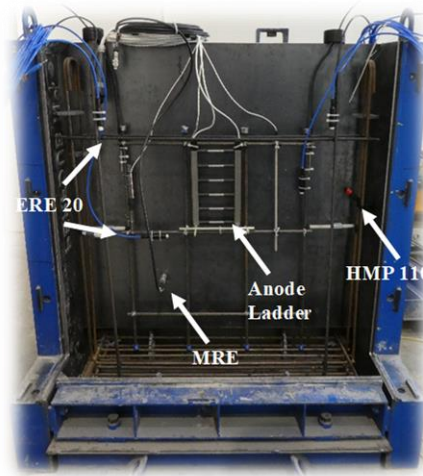
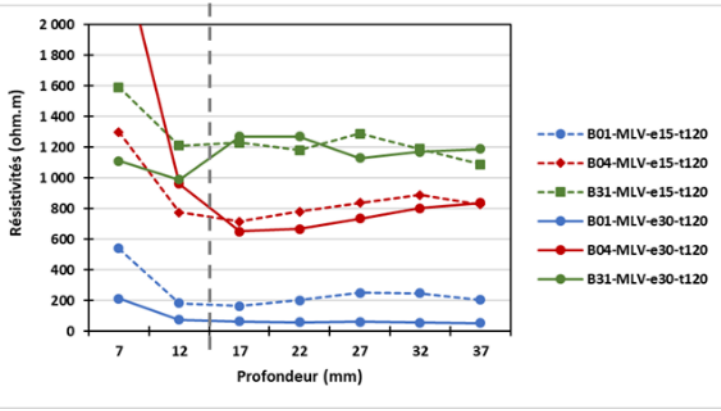
HA10

RL10

PERFDUB N°-



- Dimensions (mm)
 - partie verticale 1000*1000*160
 - semelle 1000*400*150
- Poids ≈ 600 kg
- + Eprovettes 11x22 cm
- Puce RFID
- Armatures acier carbone ϕ 10 mm (connexion CPneg)



► Premiers constats

- Des résultats intéressants pour les deux actions « Corps d'épreuve » et « Corrosion des prismes »
- Valeur ajoutée de l'**approche combinée durabilité des bétons ET corrosion des armatures**
- **Déjà des questions** à la fois pour les **structures neuves et les structures existantes** sur les volets durabilité et corrosion des armatures...
- Nécessité d'**organiser** et de **coordonner** ces actions sur les 20 prochaines années pour continuer le suivi de la **durabilité des béton et de la corrosion des armatures** pour différentes formules de béton et dans des environnements urbains et marins (proposition de GIS EOS)



► Principaux objectifs du GIS - EOS

- Constituer un **réseau national, interinstitutionnel et interdisciplinaire** de compétences scientifiques liées au domaine de la durabilité des béton et de la corrosion des armatures des ouvrages en béton armé
- **Poursuivre les travaux engagés** dans le cadre des projets nationaux Perfdub (2015-2022) et BHP2000 (1995-2003) et des projets ANR Modevie (2015-2019) et Applet (2007-2010), notamment sur le suivi du **vieillessement naturel** de **corps d'épreuve en béton armé** dans différents environnements et l'action « **Corrosion des prismes** »
- Constituer un **organe scientifique contributeur aux principales instances de normalisation française et européenne** qui traitent des sujets liés à la durabilité des bétons et à la corrosion des armatures, pour des ouvrages existants ou dans le contexte des bétons à faible impact environnemental et en particulier à plus faibles émissions de CO₂
- Participer au **transfert de technologie et de connaissances scientifiques** vers les principaux acteurs concernés du secteur de la construction
- Contribuer aux actions de sensibilisation, **d'information** et de **formation** (via des séminaires, webinaires, documentations, formation continue, formation initiale) à destination des entreprises, industriels, maîtres d'ouvrages, du public et des étudiants

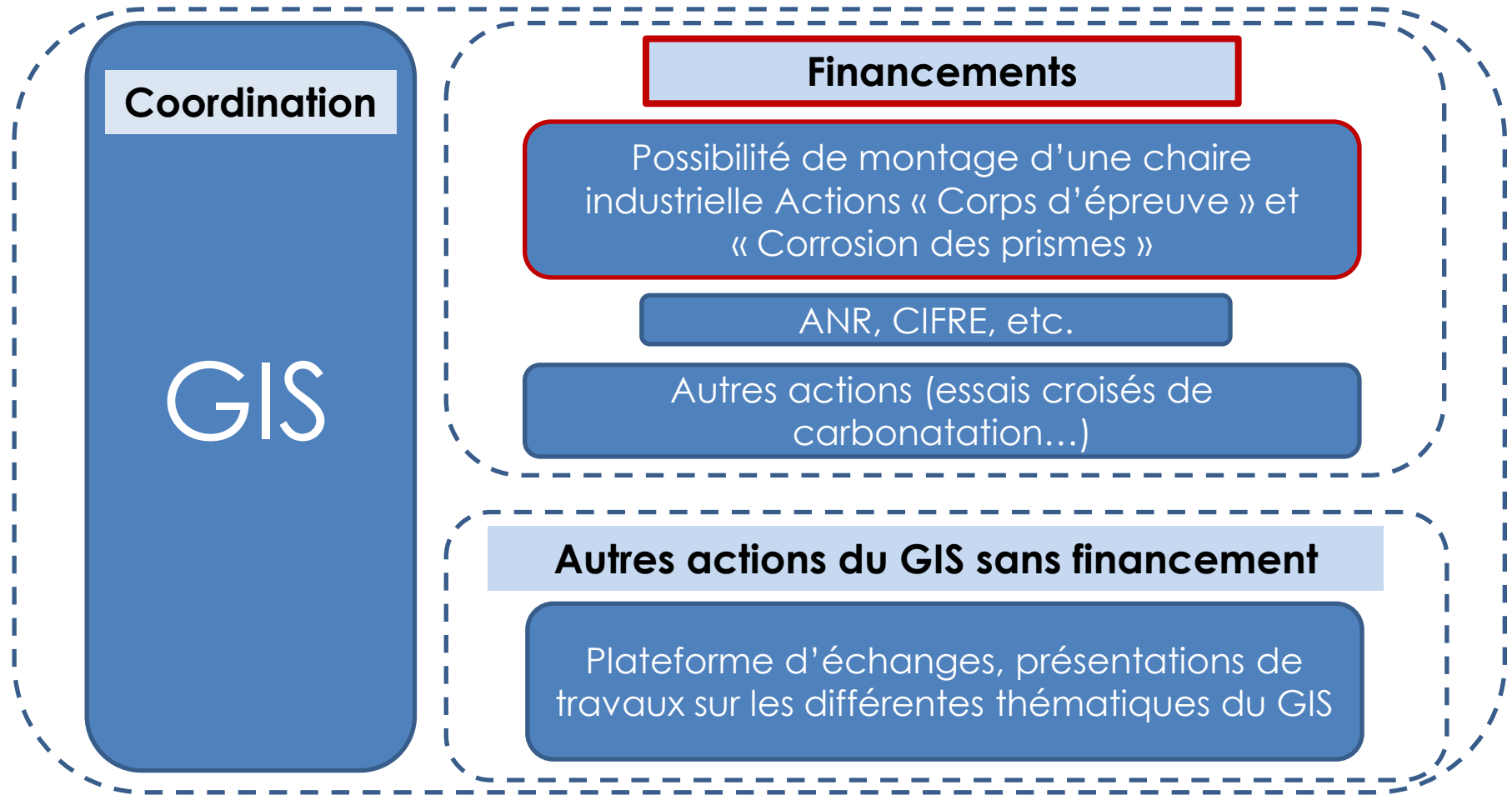


► Principaux axes de recherche intégrés du GIS - EOS

- Définition de **modes opératoires** fiables, robustes et précis pour la détermination des propriétés de durabilité des bétons, pour des structures existantes comme pour des bétons à plus faible impact environnemental, comme les bétons bas carbone
- Développement de **modèles prédictifs opérationnels pour les structures neuves et anciennes**, prenant en compte les spécificités des différents bétons (génie civil, monuments historiques, à faible impact environnemental...)
- Développement de **méthodes et d'outils pour la surveillance des ouvrages** sur une durée suffisamment longue pour appréhender l'évolution des propriétés et des dégradations
- **Optimisation du diagnostic de corrosion, par acquisition de données relatives aux phases d'initiation et de propagation de la corrosion en conditions de vieillissement naturel, avec différents types de systèmes de mesure (CND, monitoring)**
- Établissement de **liens entre le vieillissement naturel des structures, les indicateurs de durabilité, et les processus de corrosion**
- Prise en compte de **l'influence de la mise en œuvre sur la période d'initiation et de propagation de corrosion** (cure, phénomènes aux interfaces et effets de paroi, qualité de compactage, défauts ponctuels d'enrobage, taux de ferrailage, etc.)



► Organisation des actions au sein du GIS – recherche de financement



Merci pour votre attention

