

**Évaluation des performances des bétons :
de l'amélioration d'essais de durabilité existants
à la définition de nouveaux protocoles**
Synthèse des travaux du GT1

www.perfdub.fr

*Franck Cassagnabère, LMDC, Université de Toulouse
Emmanuel Rozière, GeM, UMR 6183 CNRS, Ecole Centrale de Nantes
Philippe Turcry, LaSIE, UMR 7356 CNRS, La Rochelle Université*

► PN PERFDUB

- Mise en place d'une **méthodologie de justification de la durabilité** des structures en béton armé par une approche performantielle
- Clé de l'approche : **évaluer les performances** du matériau

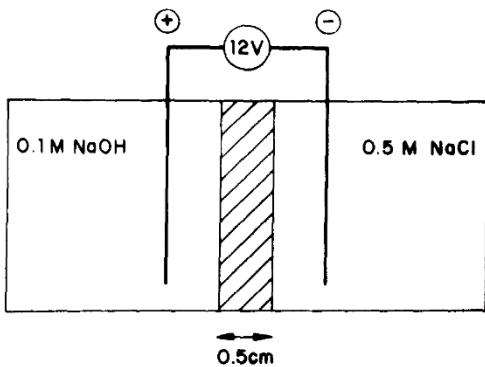
► Objectif du groupe de travail GT1

- Mise à disposition de **modes opératoires** pour évaluer les performances d'un béton d'une structure soumise à :
 - la **carbonatation** (XC)
 - la pénétration des **ions chlorures** (XS, XD)
 - les **agressions chimiques** (XA)



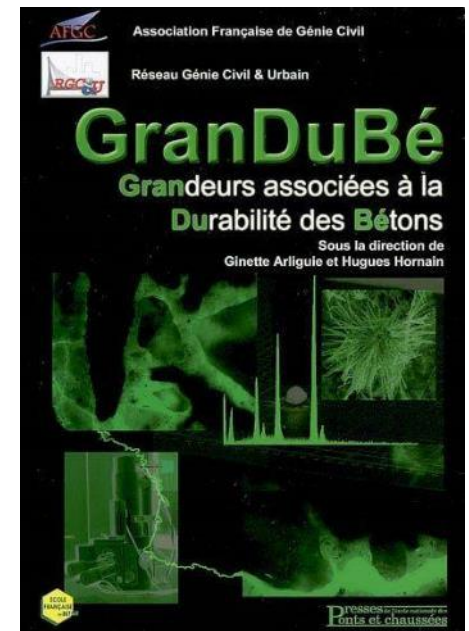
► Approche performantielle : des outils et méthodes

- Plus de 30 ans de R&D
 - Projets BHP2000, GranDuBé, Chlortest, APPLET, etc.



Simple representation of the cell for testing chloride migration.

(Andrade, 1993)



► Comment évaluer les performances du béton?

- Grâce à des **indicateurs de durabilité**, propriétés du matériau contrôlant le phénomène de vieillissement
 - *exemples : porosité, coefficient de diffusion des chlorures*
- Grâce à un **essai de vieillissement accéléré** représentatif du phénomène « naturel »
 - *exemples : lixiviation accélérée, carbonatation accélérée*



► Comment classer le béton?

- **Approche absolue** : comparer les performances à des valeurs seuils de la classe d'exposition
 - *approche privilégiée pour XC, XS, XD (et XA3 - RSE)*
- **Approche comparative** : comparer les performances du béton étudié avec celles d'un béton de référence
 - *approche retenue pour XA*



► 2 groupes de travail

■ Classes XC, XS, XD

- Consolidation ou modification de modes opératoires d'essais existants, normalisés ou non
- Partenaires impliqués : Bouygues, Cerema, CERIB, EDF, GeM, Ginger CEBTP, LafargeHolcim, LAMcube, LaSIE, LERM, LGCGM, L2MGC, SigmaBéton, Vinci.

■ Classes XA

- Lixiviation eau pure / eau douce, biodégradation, réaction sulfatique externe (RSE)
- Développement d'essais de vieillissement accéléré
- Partenaires impliqués : CERIB, GeM, LMDC, UGE

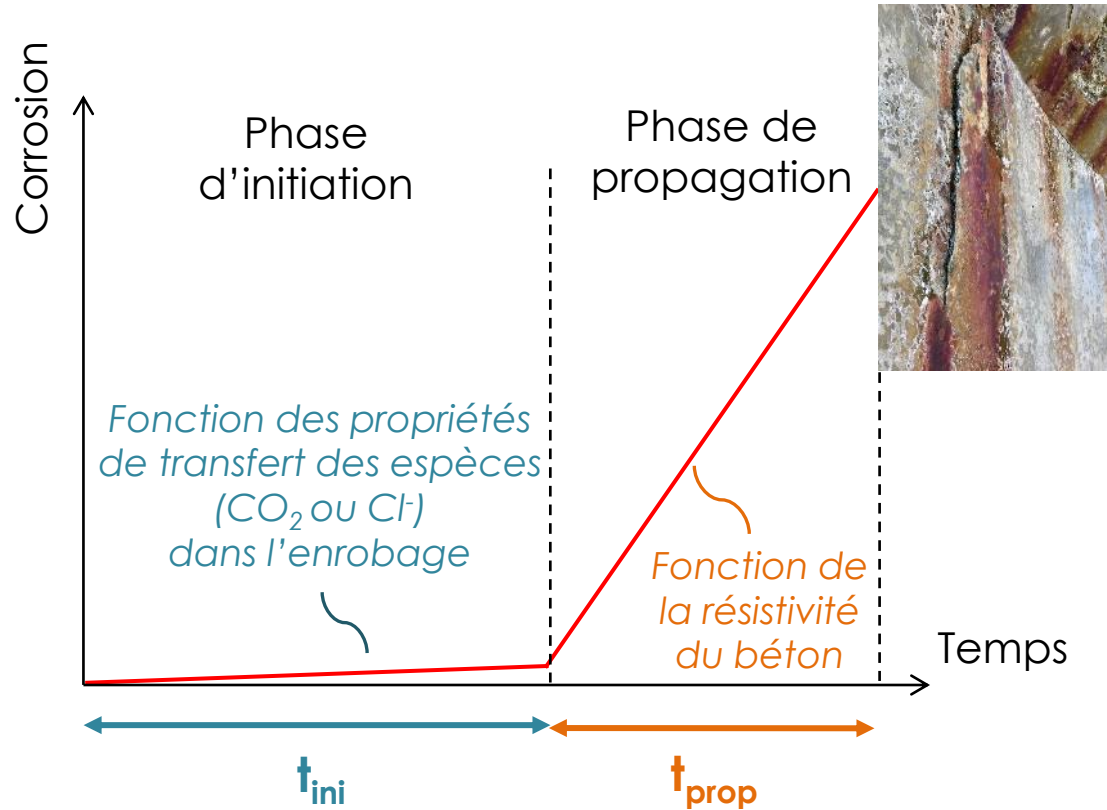


CLASSES D'EXPOSITION XC, XS/XD

RESTITUTION DU GT1A





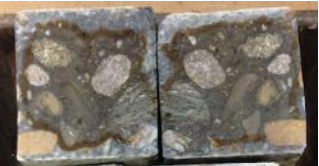
► Durabilité vs. risque de corrosion



Durée de vie de l'ouvrage
 =
 $t_{ini} + t_{prop}$



► Indicateurs et essais

Exposition	Phase d'initiation de la corrosion	Phase de propagation de la corrosion
<p>XC Carbonatation</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Essai de carbonatation accéléré - Porosité accessible à l'eau - Perméabilité au gaz 	<ul style="list-style-type: none"> - Résistivité électrique 
<p>XS / XD Chlorures</p> 	<ul style="list-style-type: none"> - Coefficient de migration des ions chlorures 	

⇒ 5 modes opératoires d'essai
 (sur béton après 90 jours de cure sous eau)



► Démarche de travail

Modes opératoires
existants (MO)
Version 1

Phase 1

Analyse des MO
Essais croisés
Etudes paramétriques
5 bétons d'étude
5 laboratoires / essai

Phase 2

Caractérisation
de
42 bétons

*5 laboratoires /
béton / essai*

Phase 3

Campagnes
d'essais
inter-laboratoires

3 bétons
*> 10 laboratoires /
essai*

Modifications des MO
⇒ **Version 2**

Base de données
Ajustements des MO
⇒ **Version 3**

Données de fidélité
(NF ISO 5725)

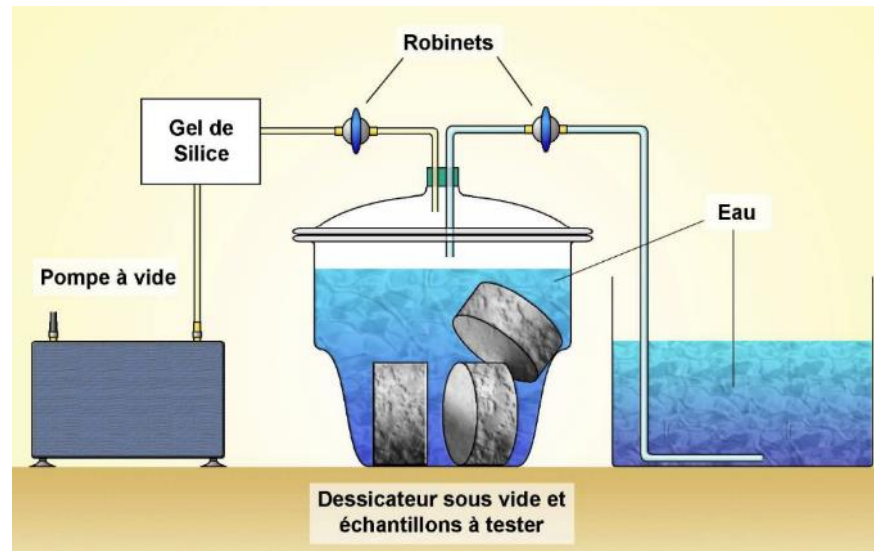
⇒ **Version finale**



► Application de la démarche

▪ Exemple : Porosité accessible à l'eau

- NF P18-459 (2010) : Saturation en eau sous vide pendant 48h puis étuvage à 105 °C jusqu'à « masse constante »

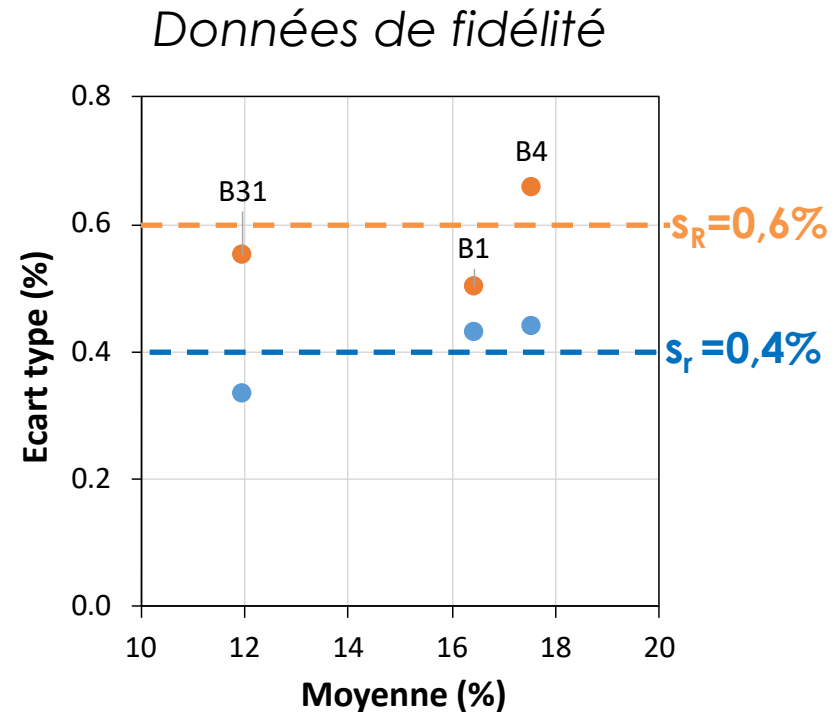
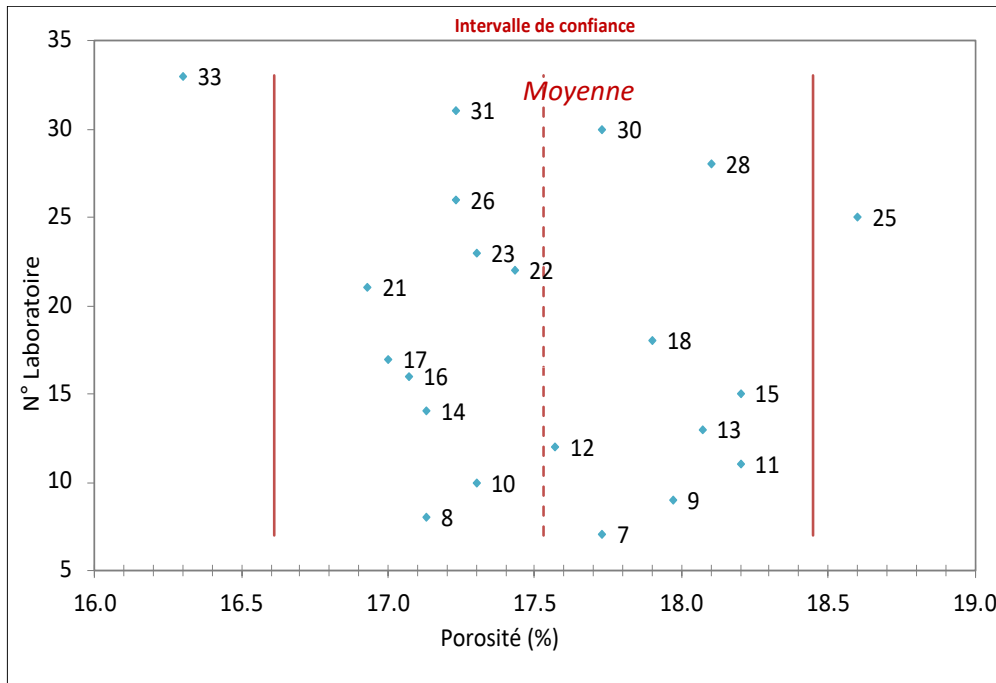


- Essais croisés : **Bonne répétabilité / reproductibilité**
- Modifications mineures de la procédure existante (précisions sur la taille des éprouvettes et sur le protocole d'étuvage à 105°C)



► Application de la démarche

- Exemple : **Porosité accessible à l'eau**
 - Essais inter-laboratoires (3 bétons et 24 laboratoires)



s_R : écart-type de reproductibilité
 s_T : écart-type de répétabilité



► Bilan général

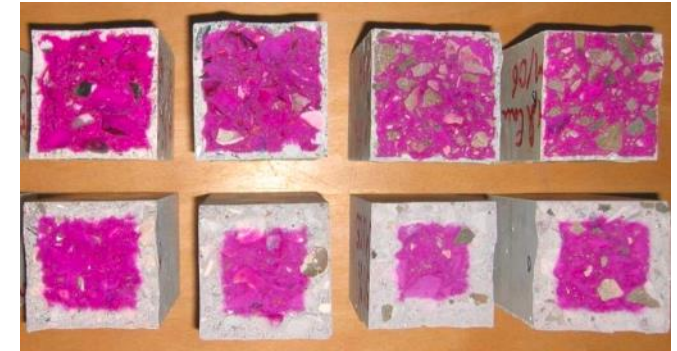
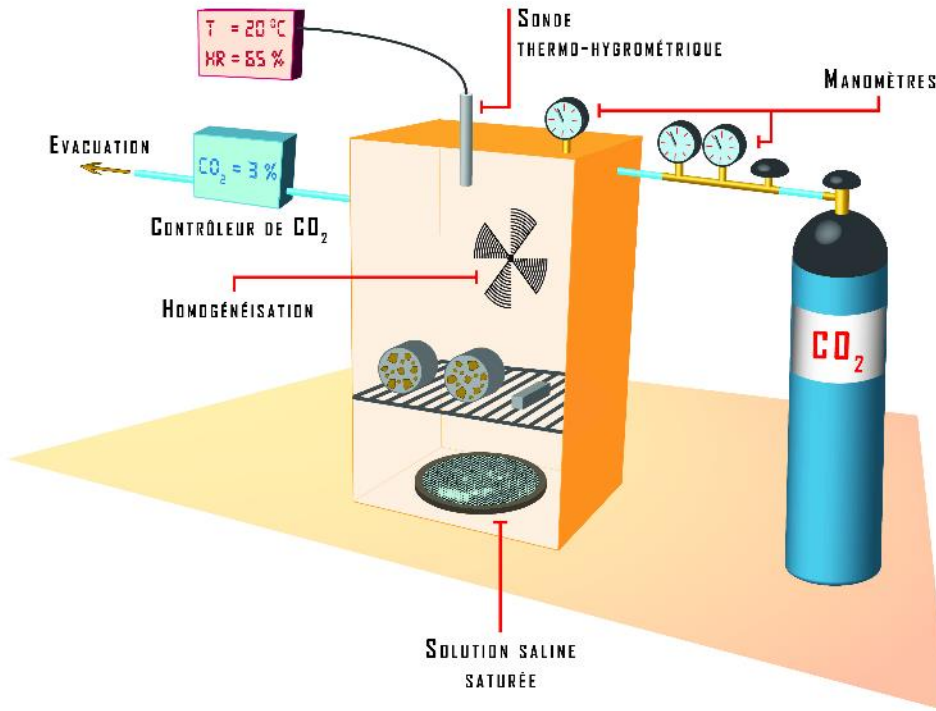
Classe	Essai (Mode opératoire initial)	Evaluation	Modifications du protocole	Données de fidélité
XC	Porosité accessible à l'eau (NF P18-459)	Très bonne répétabilité / reproductibilité	Mineures	$s_r = 0,4\%$ $s_R = 0,6\%$
XC	Perméabilité au gaz (XP P18-463)	Bonne répétabilité / reproductibilité	Mineures	$[K_g > 75.10^{-18} \text{ m}^2]$ $s_r/m = 20\%$ $s_R/m = 20\%$
XC	Carbonatation accélérée (FprCEN/TS12390-12:2010, XP P18-458)	Faible répétabilité / reproductibilité	Majeures	-
XC, XD	Migration des ions chlorures (XP P18-462)	Bonne répétabilité / reproductibilité	Mineures	$s_r/m = 8 \%$ $s_R/m = 24\%$
XC, XS, XD	Résistivité (LCPC 2010, prEN 12390-19)	Bonne répétabilité / reproductibilité	Mineures	$[0-250 \Omega.m]$ $s_r/m = 8 \%$ $s_R/m = 20 \%$

s_r : écart type de répétabilité ; s_R : écart type de reproductibilité ; m : moyenne



► Essai de carbonatation accéléré

- Dispositif expérimental



(Roziere et al., CBM, 2009)

© Vincent Wisniewski



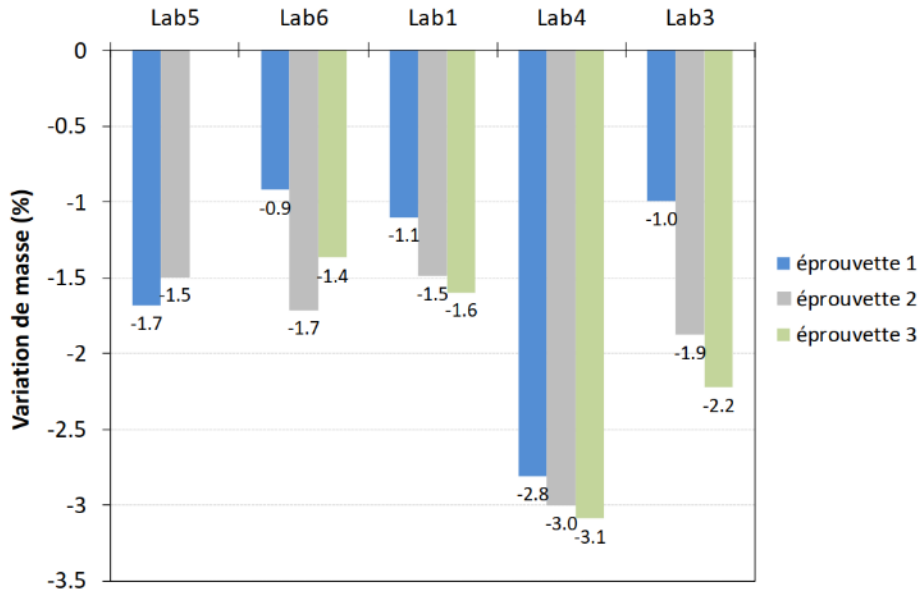
► Essai de carbonatation accéléré

- Mode opératoire de l'essai européen FprCEN/TS12390-12
 - **Cure** : 90 jours
 - **Préconditionnement** : 14 jours de séchage à 20 °C et 65% HR
 - **Carbonatation** : 70 jours à 3% CO₂, 20°C et 65% HR
- Mise en défaut de l'essai lors de la phase 1
 - **Faible reproductibilité**, expliquée (en partie) par les différences d'équipement entre laboratoire
 - **Faible sensibilité**, expliquée par la faible efficacité du préconditionnement
 - Géométrie des éprouvettes (7 x 7 x 28 cm) mal adaptée



► Essai de carbonatation accéléré

- Modifications proposées
 - Faible reproductibilité du préconditionnement (figure ci-dessous)
 - Solution
 - contrôle de l'étuvage par suivi de masse d'éprouvettes 4 x 4 x 16 cm de mortier normalisé
 - 2 conditions d'arrêt : durée ≥ 14 jours et perte de masse du mortier $\geq 5.5\%$



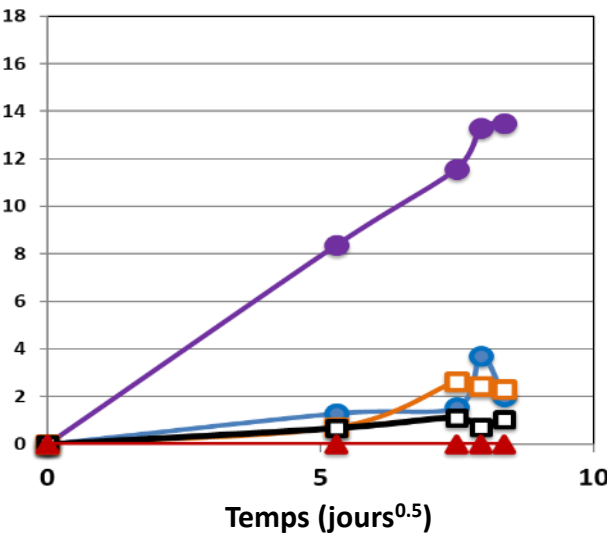
Variations de masse suite au préconditionnement déterminées par 5 laboratoires (béton B1)



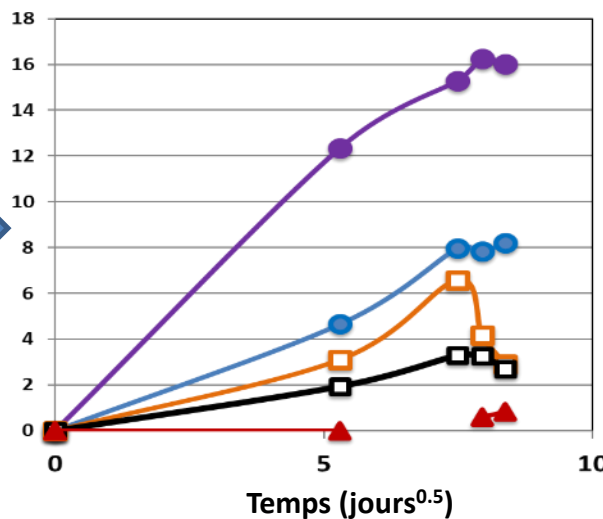
► Essai de carbonatation accéléré

- Modifications proposées
 - Faible sensibilité de l'essai européen (peu d'efficacité du préconditionnement à désaturer significativement les éprouvettes avant carbonatation)
 - Solution : étuvage préalable de 14 jours à $45 \pm 5 \text{ °C}$

Préconditionnement 14 jours 20 °C et 65% HR



Préconditionnement 14 jours à 45°C



● B1 ● B4 ■ B7 ■ B31 ▲ B38

B1 : CEM I, $E_{\text{eff}}/C=0,6$
 B4 : CEM III, $E_{\text{eff}}/C=0,6$
 B7 : CEM I, $E_{\text{eff}}/C=0,6$ (BAP)
 B31 : CEM III, $E_{\text{eff}}/C=0,4$
 B38 : CEM I + FS, $E_{\text{eff}}/C=0,35$

(Etude du L2MGC)



► Essai de carbonatation accéléré

- Comparaison des modes opératoires

Essai européen

(FprCEN/TS12390-12)

Séchage de 14 jours
à 20 ± 2 °C et $65 \pm 5\%$ HR



Carbonatation
à 20 ± 2 °C et $65 \pm 5\%$ HR
[CO₂] = $3 \pm 0,5\%$
Échéances : 28, 56, 63 et 70 jours

3 éprouvettes : 7 x 7 x 28 cm

Essai Perfdub

(version finale)

Etuvage à 45 ± 5 °C pendant ≥ 14 jours
(+ perte de masse mortier $\geq 5,5\%$)
Conservation à 20 ± 2 °C et $65 \pm 5\%$ HR
pendant 7 jours



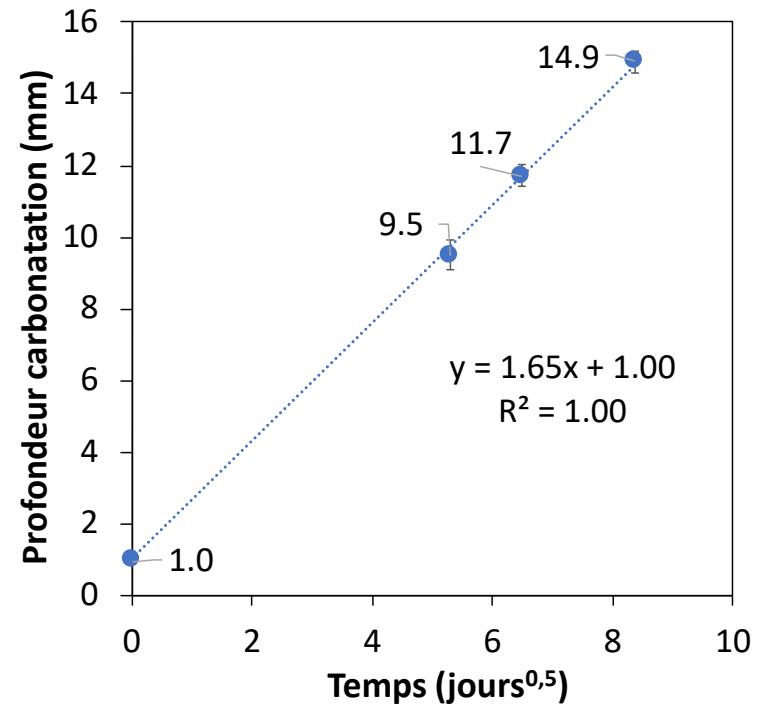
Carbonatation
à 20 ± 2 °C et $65 \pm 5\%$ HR
[CO₂] = $3 \pm 0,5\%$
Échéances : 0, 28, 42 et 70 jours

10 éprouvettes : $\varnothing 11$ x H11 cm
(provenant de 5 cylindres $\varnothing 11$ x H 22 cm)



► Essai de carbonatation accéléré

- Expression des résultats de l'essai
 - **Vitesse de carbonatation** (K_{acc}) déterminée par régression linéaire à partir de 4 points
 - Exprimée en $\text{mm/jour}^{1/2}$
- Deux critères de validation :
 - Si $K_{acc} \geq 1 \text{ mm/jour}^{1/2}$, $R^2 \geq 0,95$
 - Si $K_{acc} < 1 \text{ mm/jour}^{1/2}$, $R^2 \geq 0,90$



► Essai de carbonatation accéléré

- Campagne inter-laboratoires (phase 3) : peu concluante...
 - Nombre de participants : 11 à 12
 - Rendu incomplet de résultats pour 10% des participants
 - *Confinement en 2020 : campagne interrompue*
 - Mode opératoire du préconditionnement non respecté par plus de 30% des participants
 - Critère de validation de la vitesse K_{acc} parfois non rempli
- Malgré tout, données de fidélité obtenues pour 2 bétons :
 - béton B4 (E/C=0,6, CEM III/A) : $m = 1,97 \text{ mm/jour}^{1/2}$; $s_R/m = 13\%$
 - béton B31 (E/C=0,4, CEM III/A) : $m = 0,71 \text{ mm/jour}^{1/2}$; $s_R/m = 31\%$



CLASSES D'EXPOSITION XA – ATTAQUES CHIMIQUES EXTERNES

RESTITUTION DU GT1C



► Contexte – Un ouvrage dans son environnement

- Ouvrages dans son environnement → « Attaques chimiques »



*Dégradation
par ruissellement de l'eau*



*Dégradation H₂S
d'un réseau d'assainissement*



*Dégradation pied de poteau
par attaque sulfatique*

- Certains protocoles de vieillissement accélérés → Bien définis (RAG, RSI)
- Contexte des « attaques chimiques externes » → Pas d'essai normalisé pour l'utilisation par Approche Performantielle



► Critères XA selon EN 206-CN

- « Attaques chimiques externes » → 3 classes d'exposition XA selon l'EN206/CN

Caractéristiques chimiques	Références	XA1	XA2	XA3
<i>Eau souterraine</i>				
SO ₄ ⁻² (mg/l)	EN 196-2	≥ 200 et ≤ 600	> 600 et ≤ 3000	> 3000 et ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 et ≥ 5,5	≤ 5,5 et ≥ 4,5	< 4,5 et ≥ 3,5
CO ₂ agressif (mg/l)	EN 13577	≥ 15 et ≤ 40	> 40 et ≤ 100	> 100 jusqu'à saturation
NH ⁺⁴ (mg/l)	ISO 7150	≥ 15 et ≤ 30	> 30 et ≤ 60	> 60 et ≤ 100
Mg ⁺²	ISO 7980	≥ 300 et ≤ 1000	> 1000 et ≤ 3000	> 3000 jusqu'à saturat.
<i>Sol</i>				
SO ₄ ⁻² (mg/l)	EN 196-2	≥ 2000 et ≤ 3000	> 3000 et ≤ 12 000	> 12 000 et ≤ 24 000
Acidité (ml/kg)	DIN 4030-2	> 200 Baumann Gully	<i>Non rencontré</i>	

- **Trois objectifs du GT1C**
 - Mettre en place des essais accélérés
→ cahier des charges bien défini
 - Amener les protocoles vers la normalisation
 - Faire émerger des seuils de performance pour la méthode absolue



► Stratégie de l'étude

- **Trois dégradations retenues** (après 90 jours de cure dans l'eau)
 - Lixiviation → 2 essais utilisés
 - Biodégradation → 2 essais développés
 - Réaction sulfatique externe → 2 essais utilisés
- **Trame commune par tranche**
 - Tranche 1: Développement des essais accélérés
 - Tranche 2 : Essais sur bétons du GT3
 - Tranche 3 : Essais croisés inter-laboratoires
 - Tranche 4 : Analyse et contractualisation



► Essais de vieillissement accéléré

■ Lixiviation par eau pure/acide

Pilotage : F. Jacquemot (CERIB)

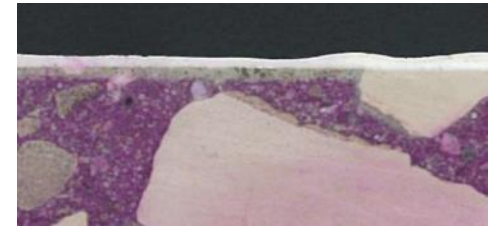
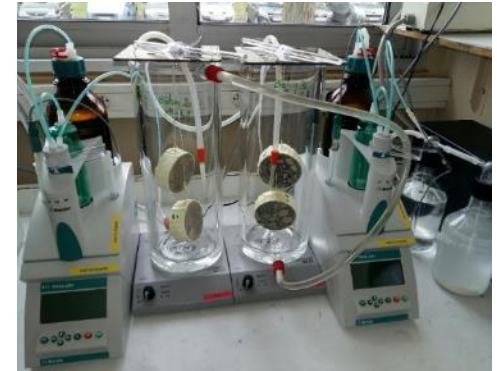
Protocoles

→ Essai de lixiviation à pH constant (*GEF8 Lixiviation*)

- pH = 4,0 / 4,5 / 5,5 en fonction de la classe XA
- T = 30 °C
- Durée : 60 jours
- Indicateur I_{Ca} (calcium lixivié sur calcium total)

→ Essai Leachcrete (*Moudilou, 2003*)

- pH = 4,0 / 4,5 / 5,5 en fonction de la classe XA
- T = 30 °C
- Durée : 40 jours
- Indicateur I_{Ca} (calcium lixivié sur calcium total)



► Essais de vieillissement accéléré

■ Biodégradation

Pilotage : M. Gueguen (U. Eiffel)

Protocoles

→ Méthode type Hambourg (Gueguen, 2016)

- Pré-traitement à l'H₂S
- Boue activée
- H₂S : 30 ppm, Température 30 °C & 100% HR
- Durée : 6 mois
- Suivi : masses et épaisseurs dégradées

→ Méthode Bac Test (Peyre Lavigne, 2015)

- Boue activée
- Solution nutritive de tétrathionate
- Durée : 11 semaines
- Suivi : lixiviats et épaisseurs dégradées



► Essais de vieillissement accéléré

■ Réaction Sulfatique Externe (RSE)

Pilotage : F. Cassagnabère (LMDC)

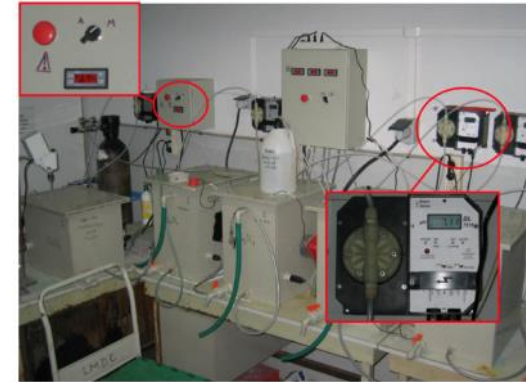
Protocoles

→ Méthode par saturation (Messad, 2009)

- Solution Na_2SO_4 (8,9 g/l)
- Durée : Saturation sous vide + 12 semaines
- Régulation de pH = 7
- Température 25 °C
- Mesures : suivi masse + élongation sur prismes
 évolution indicateurs (R_c , p_w , D_{app})

→ Méthode par immersion/séchage (SIA 262 Annexe D, 2013)

- Solution 5% Na_2SO_4 (34 g SO_4^{2-} /l)
- Cycles immersion/séchage + immersion
- Durée : 12 semaines
- Mesures : suivi masse + élongation



► Méthode de l'approche performantielle XA

■ Méthode générale

Evaluation vis-à-vis d'une dégradation → 2 cas de figure :

- **Cas général** : critères de composition conformes (L_{eq} et E_{eff}/L_{eq}) avec liant non conforme au fascicule FD P18-011
- **Cas particulier** : critères de composition non conformes (L_{eq} , E_{eff}/L_{eq} et granulats non conforme / absorption) avec liant conforme au fascicule FD P18-011

Nota : Squelette granulaire équivalent (dosage et nature minéralogique) des 2 bétons à comparer

■ Application

Approche applicable dans les cas de RSE, lixiviation eau pure/acide et biodégradation selon :

- la **méthode absolue** → valeurs **seuils** définies
- la **méthode comparative** avec un **béton de référence**



► Méthode de l'approche performantielle XA

- **Exemple avec le cas RSE : Evaluation d'une formulation de béton vis-à-vis d'une dégradation de RSE**
 - **Cas général :**

Classe d'exposition	Option 1 Essai par saturation	Option 2 Essai immersion/séchage	Béton de référence
XA1	≤ Béton de référence	≤ Béton de référence	Conforme EN206/CN ou F65 + $E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$ abaissé de 0,05 Ciment : CEM I PM
XA2	≤ Béton de référence	≤ Béton de référence	Conforme EN206/CN ou F65 + $E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$ abaissé de 0,05 Ciment : CEM I SR3
XA3	0,05 % à 12 semaines (0,07 % valeur max indivi)	0,12 % à 8 semaines	/

- **Cas particulier :** critères de composition non conformes (L_{eq} , $E_{\text{eff}}/L_{\text{eq}}$ et granulats non conformes / absorption) avec liant conforme au fascicule FD P18-011

Classes XA1, XA2 et XA3 → Méthode comparative avec essai de migration des ions Cl^- ($D_{\text{rcm}, 90}$) et béton de référence



CONCLUSIONS



► Classes XC, XS/XD

- **Un corpus de modes opératoires** consolidés (porosité, perméabilité au gaz, migration des chlorures, résistivité)
- Proposition d'un mode opératoire pour la **carbonatation accélérée** (une nouvelle campagne d'essais croisés bientôt lancée)
- Transmission aux groupes de normalisation **GEF8** et **GEDUB**
- Des **indicateurs** pour les phases d'initiation et propagation et des **données d'entrée** pour les modèles de durée de vie de l'enrobage

► Classes XA

- **Un ensemble de modes opératoires** d'essais accélérés :
 - lixiviation par eau pure/acide, biodégradation, réaction sulfatique externe
- Une méthode générale d'évaluation pour une dégradation

