



LA
NOUVELLE
ROUTE
DU LITTORAL

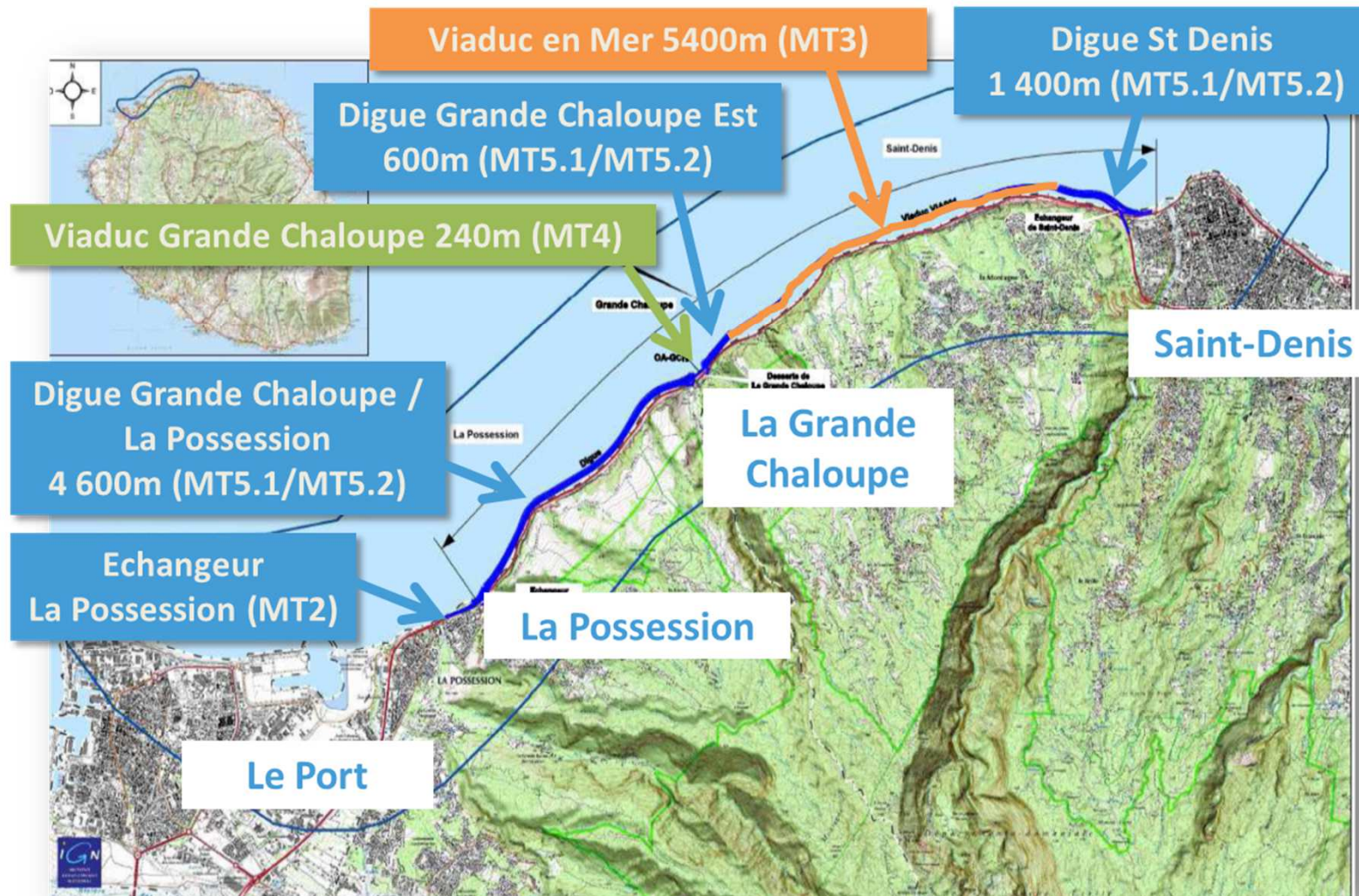


VISITE AFGC

Etude, fabrication et durabilité des bétons

24 Novembre 2017

- **Introduction**
- **Contexte local et contractuel**
- **Etudes des bétons**
- **Durabilité des bétons**
- **Etudes thermiques**
- **Contrôle des bétons**
- **PN PERFDUB**



■ La Nouvelle Route du Littoral :

— Viaduc en mer (MT3):

- 5 400 m de longueur et 30 m largeur
- 300 000 m³ de béton dont 95% préfabriqués à terre

— Digue et échangeurs (MT2/MT5):

- 240 000 m³ pour mur chasse mer et génie civil
- 310 000 m³ pour acropodes

— CCTP commun:

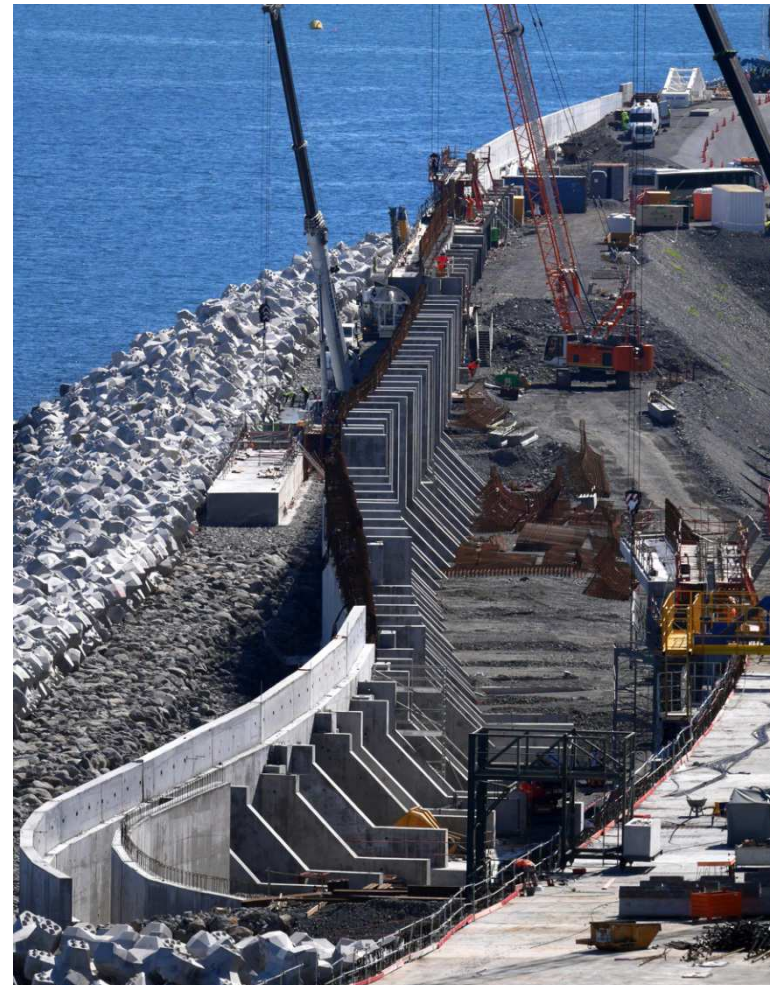
- Durée de vie 100 ans
- Prévention risque RAG
- Prévention risque RSI
- Environnement marin
- Durabilité D_{app} , P_{eau} , K_{gaz}
- Granulats basaltiques poreux



- **Viaduc en mer (MT3):**



- **Echangeur La Possession (MT2) et Diguees (MT5.1):**



■ Exposition à l'environnement marin:

XS3: Mur chasse mer
et accropodes



XS3: Voussoirs,
Chevêtres et Fûts



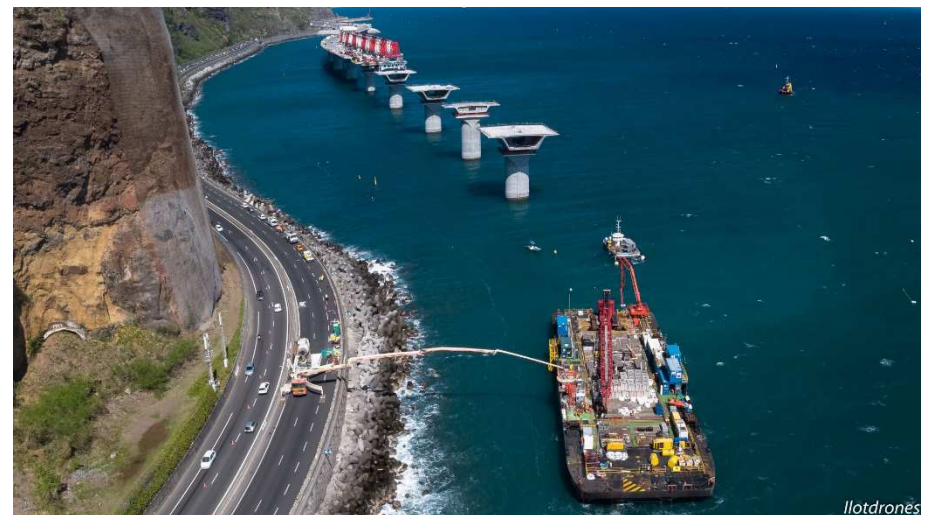
XS3: Appuis et tablier



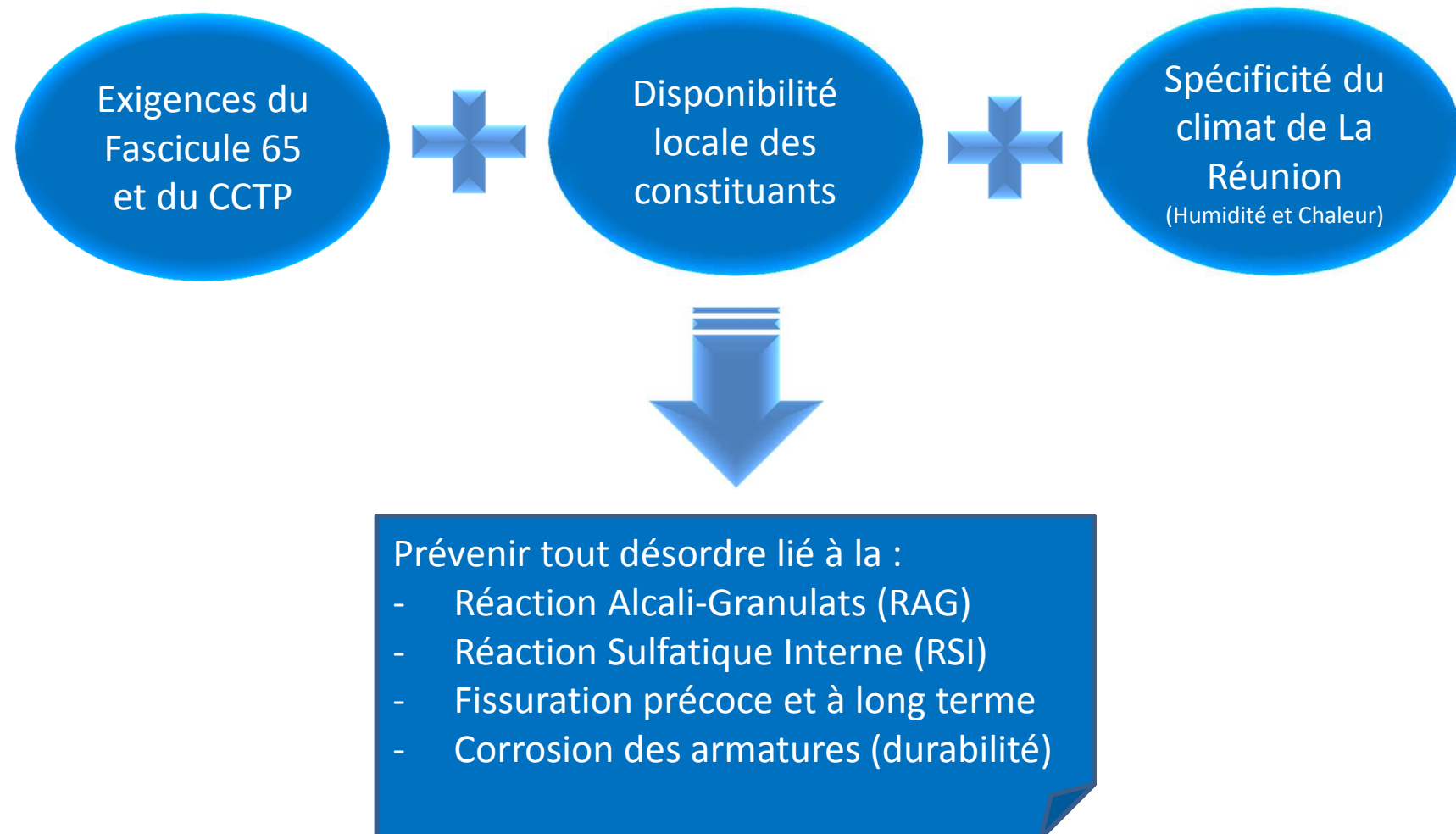
XS3: Fûts de piles
XS2: Semelles



- Adapter le matériau béton aux besoins du chantier:



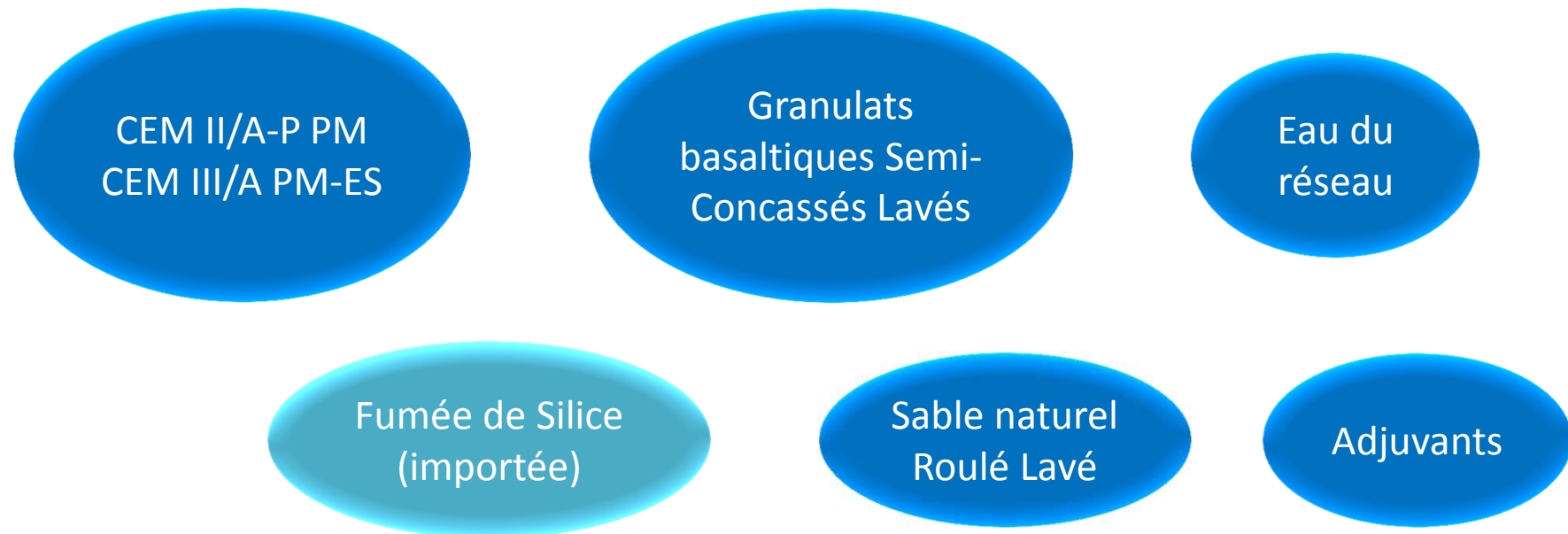
■ Contexte normatif et problématiques



- **Programme d'étude des bétons:**
 - **Appel d'offre (2013) → essais préliminaires à La Réunion**
 - **Etude BPE / BEP (2014) → consultations**
 - **Etude formulation des bétons (2014-2015):**
 - Etude formules Voussoirs, Semelles et Fûts (> 80%) avec granulats Holcim
 - Etude formules Voussoirs, Semelles et Fûts + variantes Clavages et Pieux avec granulats Teralta (carrière Plaine Chabrier: disponibilité durée chantier)
 - **Essais de convenances des bétons (2015-2016):**
 - Montage 3 CAB à la préfa voussoirs
 - Convenances formules bétons CAB principale et secours

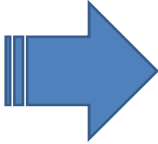


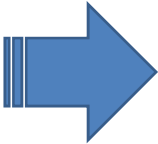
■ Composition des bétons:



Impact de la composition des bétons :

- Propriétés à long terme (nature du liant, squelette granulaire, rapport E_{eff}/L_{eq} , ...)
- Propriétés à court terme (résistance à jeune âge, aspects thermiques, ...)
- Propriétés béton frais (homogénéité, pompabilité, DPU, ...)

- **Comment optimiser les performances des structures en béton armé ?**
 - **Dans le cas des référentiels normatifs actuels, la durée de vie est basée sur le respect de certains paramètres :**
 - Epaisseur minimale d'enrobage
 - Teneur minimale en liant
 - Rapport maximal E_{eff}/L_{eq}

Normes européennes
+ annexes nationales
 - **L'approche performantielle est une autre option pour formuler des bétons durables:**
 - Essais de vieillissement accélérés
 - Indicateurs de durabilité

Fascicule N°65:
Exécution des ouvrages
de génie civil en béton

- Valeurs cibles proposées dans le Fascicule 65 pour les indicateurs de durabilité « Porosité accessible à l'eau » (P_{eau}), « Coefficient de diffusion apparent » (D_{app}) et « Perméabilité au gaz » (K_{gaz}) mesurés à 90 jours

	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
$P_{\text{eau},90j}$ (%) NF P18-459	15,5	15,5	15	14,5	14	14	13
$K_{\text{gaz},90j}$ (%) XP P18-463	-	-	200	200	-	-	200
$D_{\text{app},90j}$ (%) XP P18-462	-	-	-	-	7	7	3,5

- Ne prend pas en compte le type de liant ainsi que l'effet positif de liants résistances aux environnements marins (« PM », « ES »)
- Ne prend pas en compte le coefficient de vieillissement associé au coefficient de diffusion apparent, contrairement au Model Code *fib*

- **Approche performantielle de la durabilité des bétons**
 - **Modélisations réalisées par le CERIB en collaboration avec les experts bétons BYTP/VCGP et les chantiers (2014/2015)**
 - Model Code de la *fib* (risque de corrosion par carbonatation et ions chlorure)
 - SDReaM-CRETE du CERIB (risque de corrosion par carbonatation)
 - **Analyse de l'incidence de la porosité intrinsèque des granulats sur les propriétés de transfert et sur la porosité accessible à l'eau (LMDC)**
 - **Réalisation d'essais préliminaires avec matériaux locaux**

Définition

L'approche performantielle consiste à appréhender la durabilité des bétons en considérant non pas les seules données liées à la formulation mais certaines caractéristiques ou propriétés du matériau dont on sait qu'elles présentent un intérêt pour prévoir l'évolution de celui-ci lorsqu'il est exposé à des conditions environnementales données.

- **L'approche performantielle nécessite des outils de modélisation et une méthode spécifique pour:**
 - quantifier les indicateurs de durabilité
 - vérifier la compatibilité des valeurs envisagées par rapport aux enrobages et à la durée de vie de l'ouvrage
- **Données d'entrées:**
 - Teneur initiale en ions chlorure
 - Concentration en chlorure à la surface de l'ouvrage en fonction de la partie d'ouvrage (immergé, marnage, embruns)
 - Facteur de vieillissement
 - Température

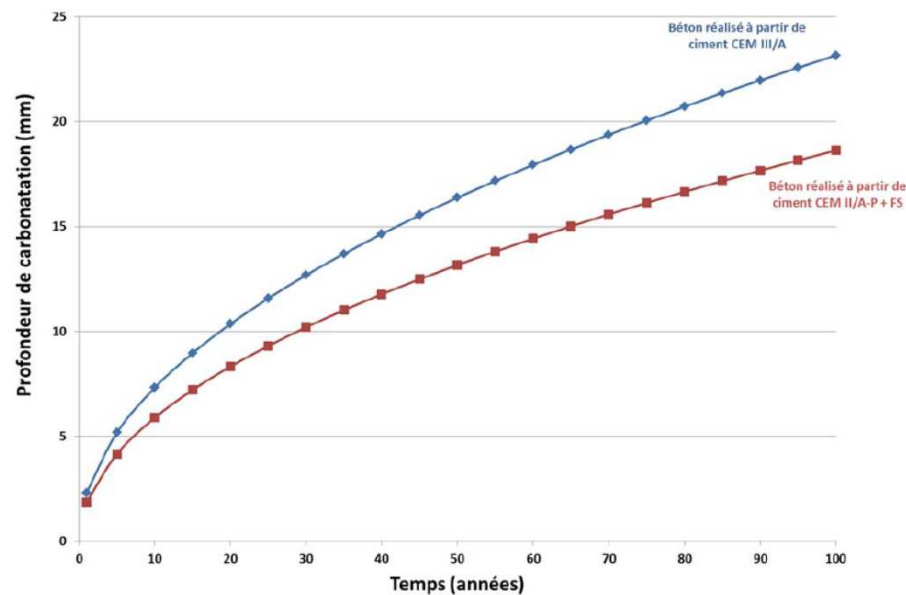
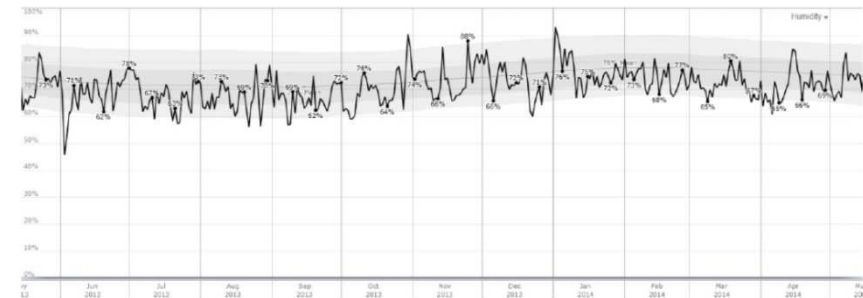
Remarque:

Prendre en compte les REX chantier, la littérature et échanger entre la direction technique du groupement, les experts, les bureaux d'études et le client

■ Modélisation du risque de corrosion par carbonatation:

Tableau 7 : Choix des paramètres de base pour le béton réalisé à partir de CEM III/A - Carbonatation

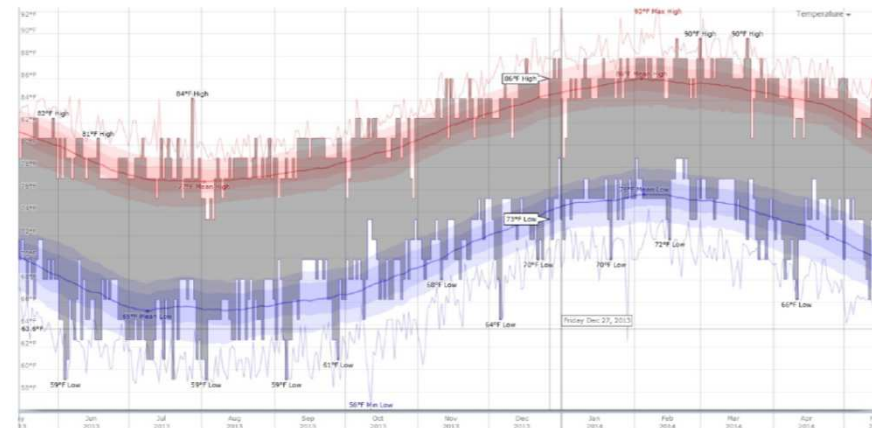
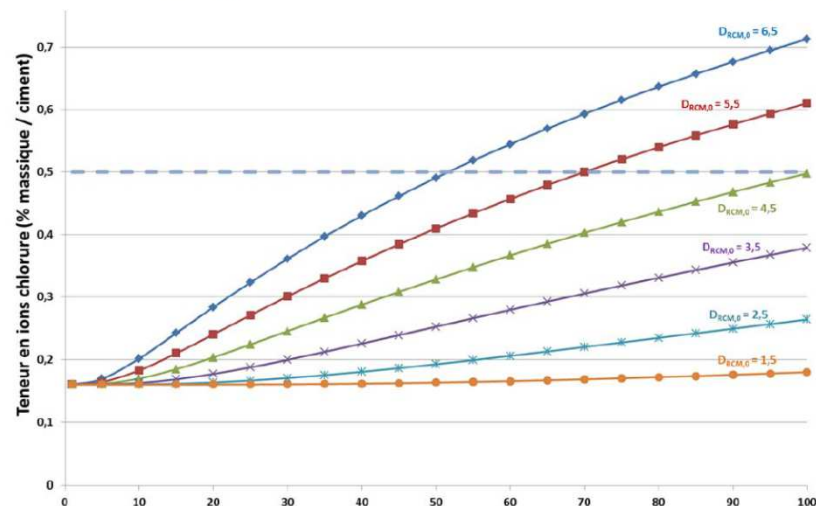
RH_{real}	Humidité relative réelle [%]	73 ¹
t_c	Période de cure [jours]	3 ²
R	Résistance moyenne à la compression à 28 jours mesurée sur éprouvettes cylindriques [MPa]	45,5 ³
C_s	Concentration moyenne en dioxyde de carbone dans l'atmosphère [$kg.m^{-3}$]	0,00082
ToW	Nombre annuel moyen de jours de pluie supérieure à 2,5 mm [-]	50 ⁴
p_{SR}	Paramètre qui dépend de la direction du vent pendant les jours de pluie et de l'orientation de la structure considérée [-]	0,1 ⁵
T	Temps (années)	100 ⁶



■ Modélisation du risque de corrosion par ions chlorure:

Tableau 9 : Choix des paramètres de base pour le béton réalisé à partir de CEM III/A - Pénétration des ions chlorure en zone de marnage

t_0	temps de référence [jours]	28 ¹
a_e	Facteur de vieillissement [-]	0,45 ²
T_{real}	Température réelle d'utilisation [K]	301 ³
D_{RCM}	Coefficient de migration des ions chlorure obtenu expérimentalement en régime transitoire au temps t_0 [10^{-12} m ² /s]	4,5 ⁴ soit 2,7 à 90 jours
C_0	Teneur initiale en ions chlorure dans le béton [% massique/ciment]	0,16 ⁵
a	Épaisseur d'enrobage minimale [mm]	60 ⁶
Δx	Fonction de transfert [mm]	9 ⁷
$C_{s,x}$	Teneur en ions chlorure à la profondeur Δx au temps t [% massique/ciment]	3 ⁸
T	Temps (années)	100 ⁹



■ Définition du facteur de vieillissement:

- Les valeurs mesurées sur des bétons réalisés à base de CEM III/A pendant la phase d'étude préliminaire amènent à des coefficients de vieillissement de l'ordre de 0,55-0,60
- Valeurs recommandées dans le *fib* Bulletin 34 (2006)

Table B2-2: Result of the statistical quantification of the variable a

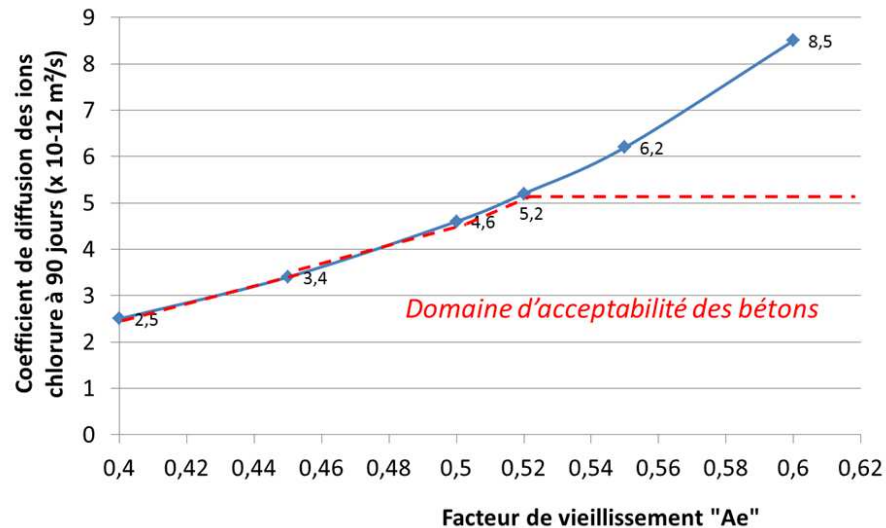
concrete	ageing exponent a^3 [-]
Portland cement concrete CEM I; $0.40 \leq w/c \leq 0.60$	Beta ($m^1=0.30$; $s^2=0.12$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)
Portland fly ash cement concrete $f \geq 0.20$; z ; $k=0.50$; $0.40 \leq w/c_{app} \leq 0.62$	Beta ($m^1=0.60$; $s^2=0.15$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)
Blast furnace slag cement concrete CEM III/B; $0.40 \leq w/c \leq 0.60$	Beta ($m^1=0.45$; $s^2=0.20$; $a^3=0.0$; $b^4=1.0$)

Formule coefficient vieillissement:

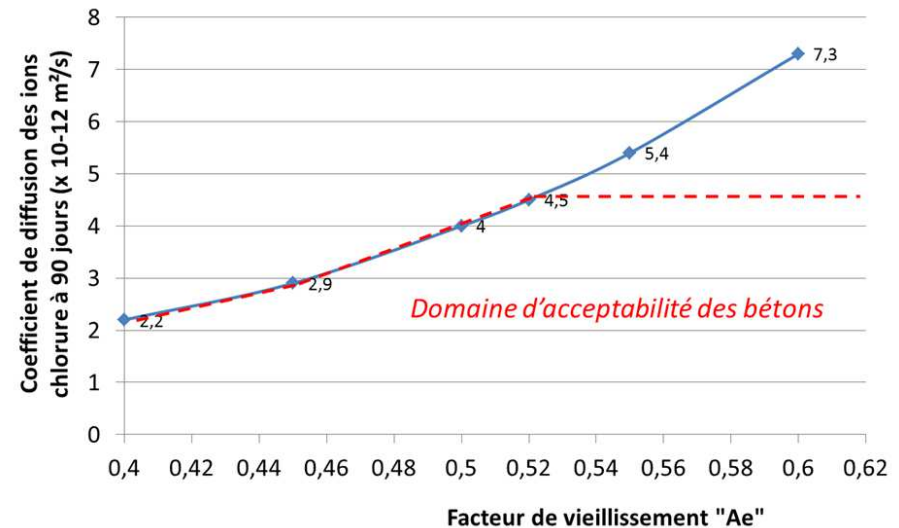
$$Ae = \frac{\left(LN \frac{D_{app,90j}}{D_{app,28j}} \right)}{\left(LN \frac{28}{90} \right)}$$

Approche basée sur Model Code *fib* 2010 modifiée pour rester compatible et sécuritaire par rapport aux recommandations françaises Fascicule 65 et Eurocode 2:
Coefficient de vieillissement entre 28 et 90 jours : 0,52

- Importance de prendre en compte l'évolution des indicateurs de durabilité



Coefficient de diffusion apparent maximal pour un ouvrage situé en zone aérienne (embruns) pour un béton à base de liant "CEM II/A-P PM + fumée de silice" et pour un enrobage minimale de 50 mm

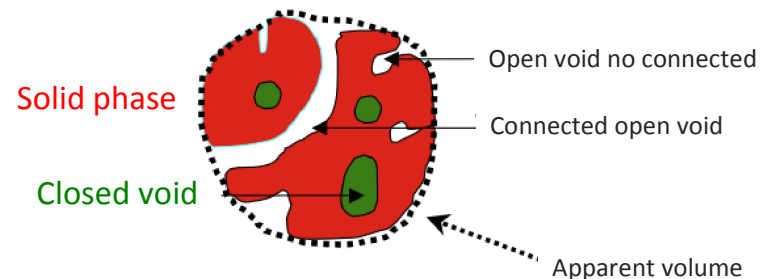


Coefficient de diffusion apparent maximal pour un ouvrage situé en zone de marnage pour un béton à base de liant "CEM III/A PM-ES + fumée de silice" et pour un enrobage minimale de 65 mm

Porosité accessible à l'eau (P_{eau})

- **Importance de la porosité intrinsèque des granulats sur la porosité accessible à l'eau du béton:**

- Granulats basaltiques poreux (Coeff. absorption $\approx 2,5\%$)



- Nécessité de saturer les granulats en amont de la production pour éviter la chute brutale de consistance
- Faible quantité d'eau d'ajout au moment de la fabrication des bétons

Remarque:

A cause de la saturation en eau des granulats, la quantité d'eau d'ajout est limitée à environ 70 L/m³ et à 30 L/m³ en cas d'ajout de 40 kg/m³ de glace pilée

■ Estimation de la porosité accessible à l'eau :

— Modèle simplifié proposé par Cussigh et Linger:

$$P = E_{\text{eff}} + E_{\text{abs}} + A - E_{\text{liée}}$$

- P : Porosité accessible à l'eau
 - E_{eff} : Eau efficace pour 1m^3 de béton
 - E_{abs} : Eau absorbée par les granulats pour 1m^3 de béton
 - A : Quantité d'air occlus pour 1m^3 de béton
 - $E_{\text{liée}}$: Quantité d'eau liée pour 1m^3 de béton (hypothèse: 17 à 20% du poids ciment)
- Exemple pour un béton C40/50 XS2 SEMELLES:
- E_{eff} : 175 L ; Air: 20 L ; $E_{\text{liée}}$: $0,2 \times 390 \text{ kg/m}^3$ soit 78 L
 - E_{abs} : 48 L si abs. à 2,5% et 19 L si abs. à 1%
 - P : 16,5% si abs. à 2,5% et 13,6% si abs. à 1%

Remarque:

L'augmentation de 1% de la porosité intrinsèque des granulats correspond à une augmentation théorique de la porosité accessible à l'eau de 2%

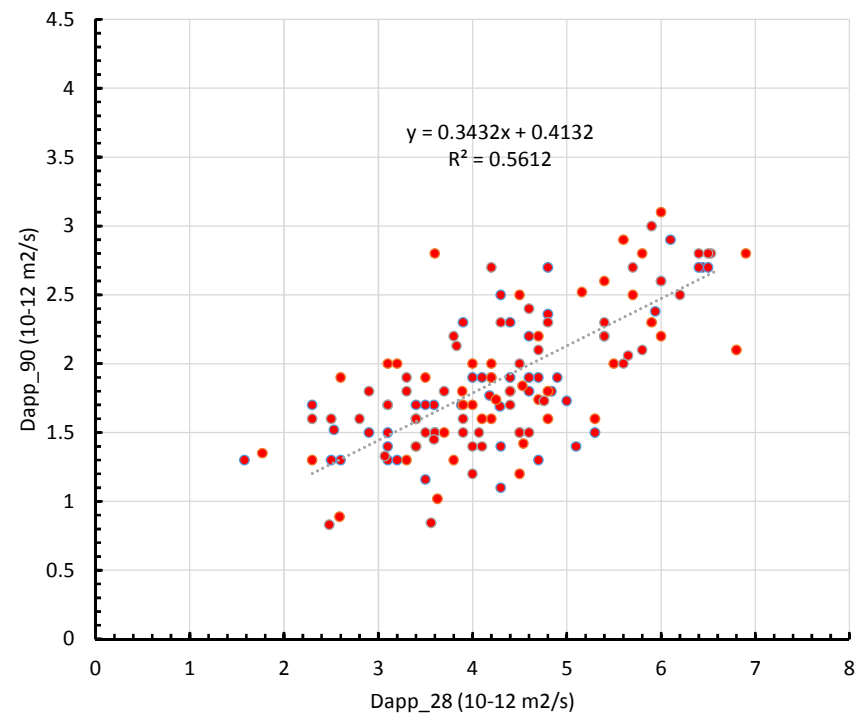
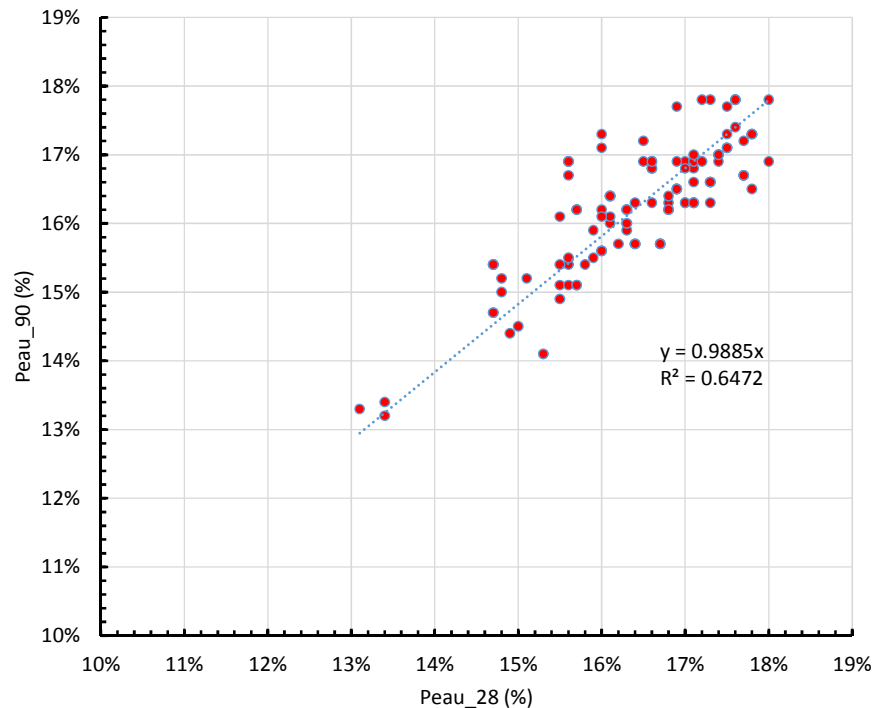
Valeurs cibles du CCTP et du Fascicule 65 non réalistes avec les matériaux locaux

■ Comparatif des exigences des indicateurs de durabilité

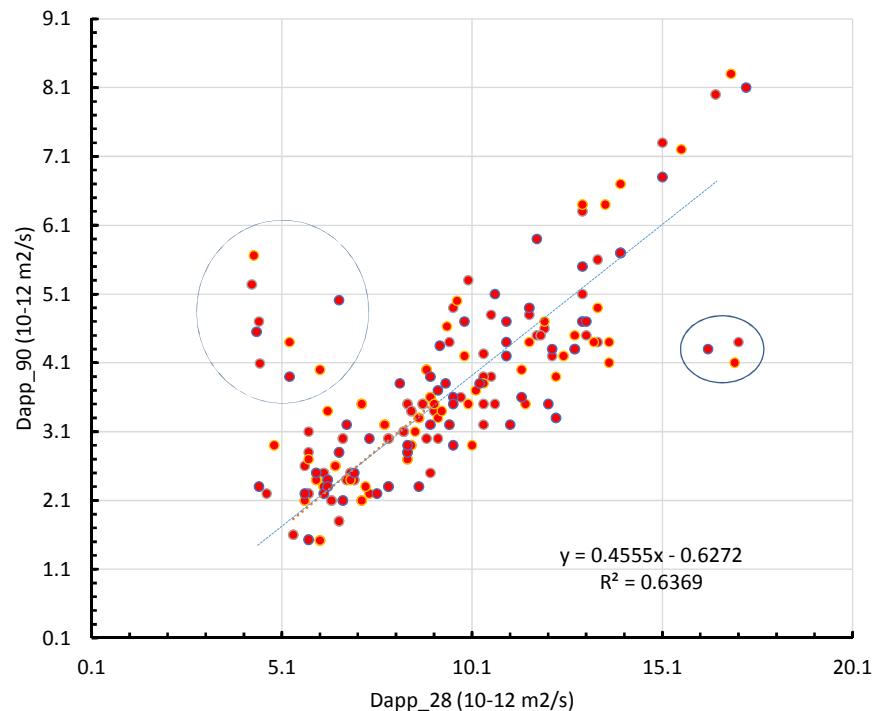
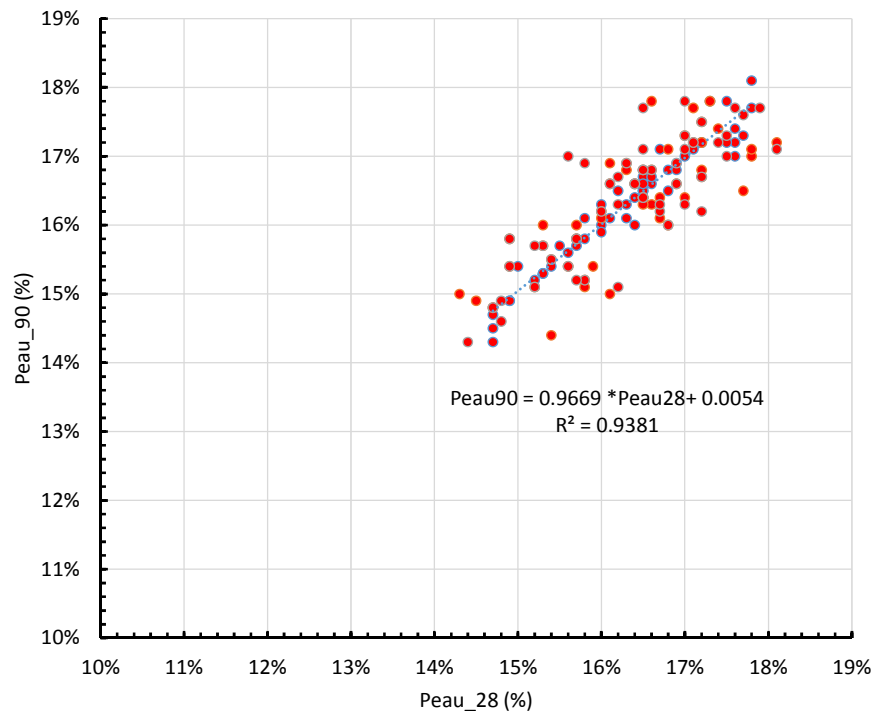
	CCTP XS2	F65 XS2	Etude durabilité Zone immergée XS2
$P_{\text{eau},90j}$ (%)	12%	14%	18%
$D_{\text{app},90j}$ (m ² /s)	5.10^{-12}	7.10^{-12}	$9,1.10^{-12}$ (AF:0,52)
$K_{\text{gaz},90j}$ (m ² /s)	-	-	-

	CCTP XS3	F65 XS3	Etude durabilité Zone marnage XS3 CEM III/A + FS	Etude durabilité Zone aérienne XS3 CEM II/A-P + FS
$P_{\text{eau},90j}$ (%)	10%	13%	18%	
$D_{\text{app},90j}$ (m ² /s)	2.10^{-12}	$3,5.10^{-12}$	$4,5.10^{-12}$ (AF:0,52)	$5,2.10^{-12}$ (AF:0,52)
$K_{\text{gaz},90j}$ (m ² /s)	100.10^{-18}	200.10^{-18}	200.10^{-18}	

- **Analyse statistique des résultats de durabilité (Juin 2017):**
 - **Béton « CEM III/A PM-ES + FS » en zone de marnage**
 - P_{eau} : Résultats satisfaisants et pas d'évolution entre 28 et 90 jours
 - D_{app} : Résultats satisfaisants ($D_{\text{app},90j,\text{moy}}$: $1,9 \cdot 10^{-12}$ m²/s) et forte évolution entre 28 et 90 jours ($A_{e,\text{moy}}$: 0,69)



- **Analyse statistique des résultats de durabilité (Juin 2017):**
 - **Béton « CEM II/A-P PM + FS » en zone aérienne**
 - P_{eau} : Résultats satisfaisants et pas d'évolution entre 28 et 90 jours
 - D_{app} : Résultats satisfaisants ($D_{\text{app},90\text{j},\text{moy}}$: $4,0 \cdot 10^{-12}$ m²/s) et forte évolution entre 28 et 90 jours ($A_{\text{e},\text{moy}}$: 0,80)



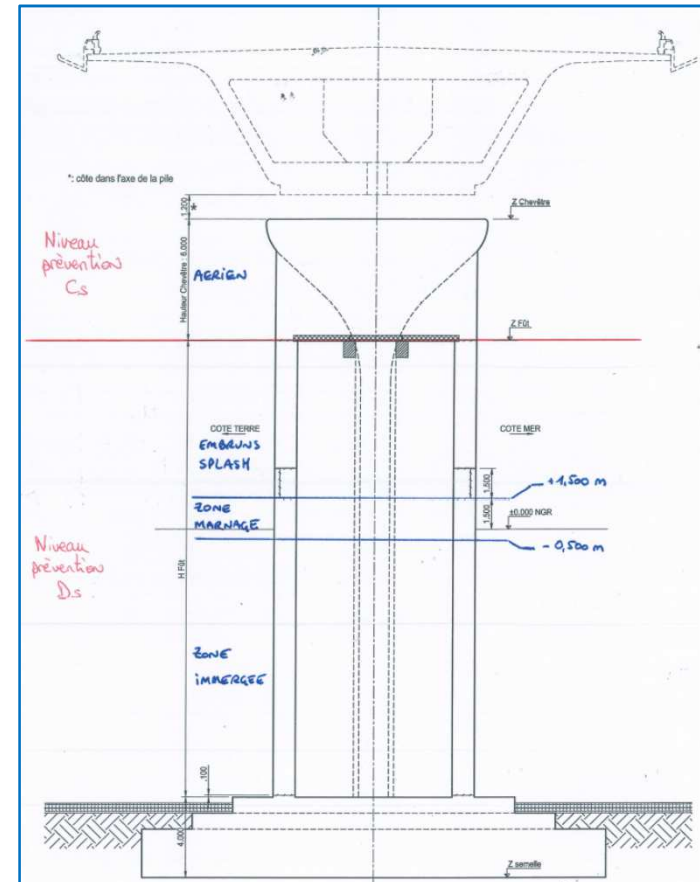
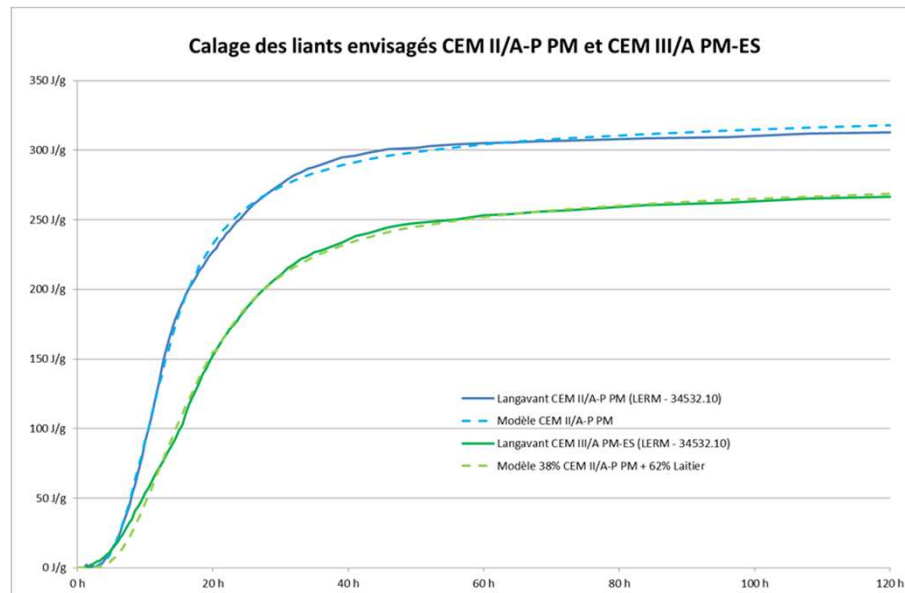
- **Température béton $\leq 32^{\circ}\text{C}$ au moment de la mise en œuvre**
 - Conditions locales chaudes en période estivale
 - Dimensionnement CAB -> production béton « froid »
 - Production d'eau à 4°C
 - Refroidissement gravillons
 - Production de glace pilée

Remarque:

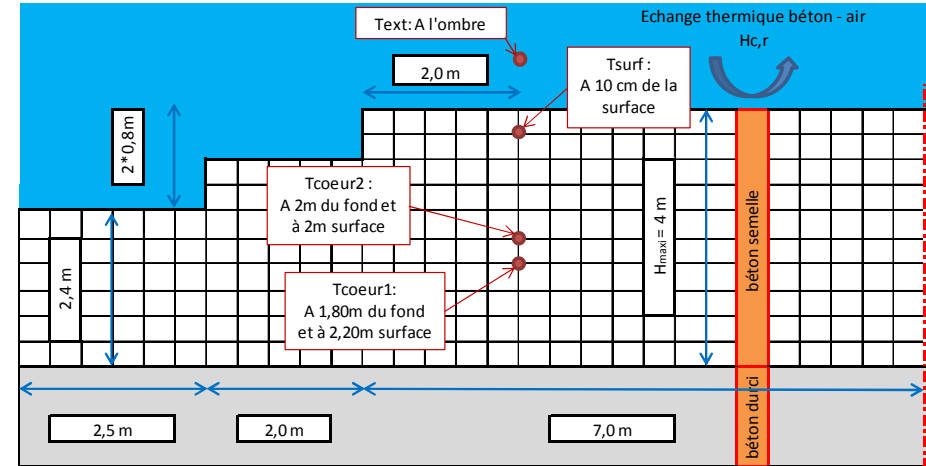
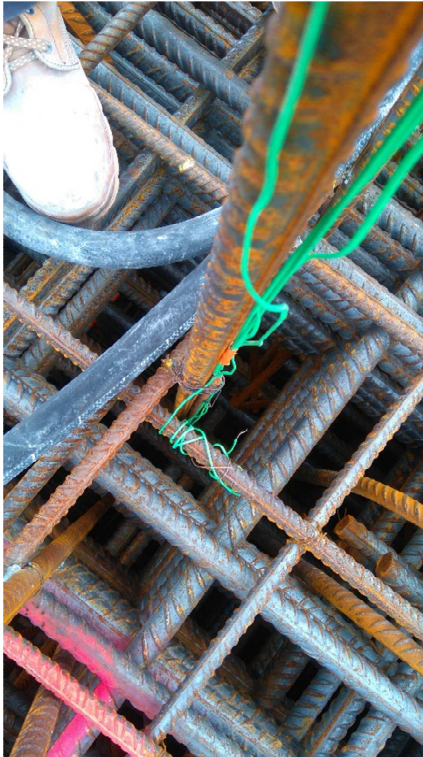
*Critère plus strict pour pièces massives
(ex. $T_{\text{béton}} \leq 26^{\circ}\text{C}$ pour les semelles)*



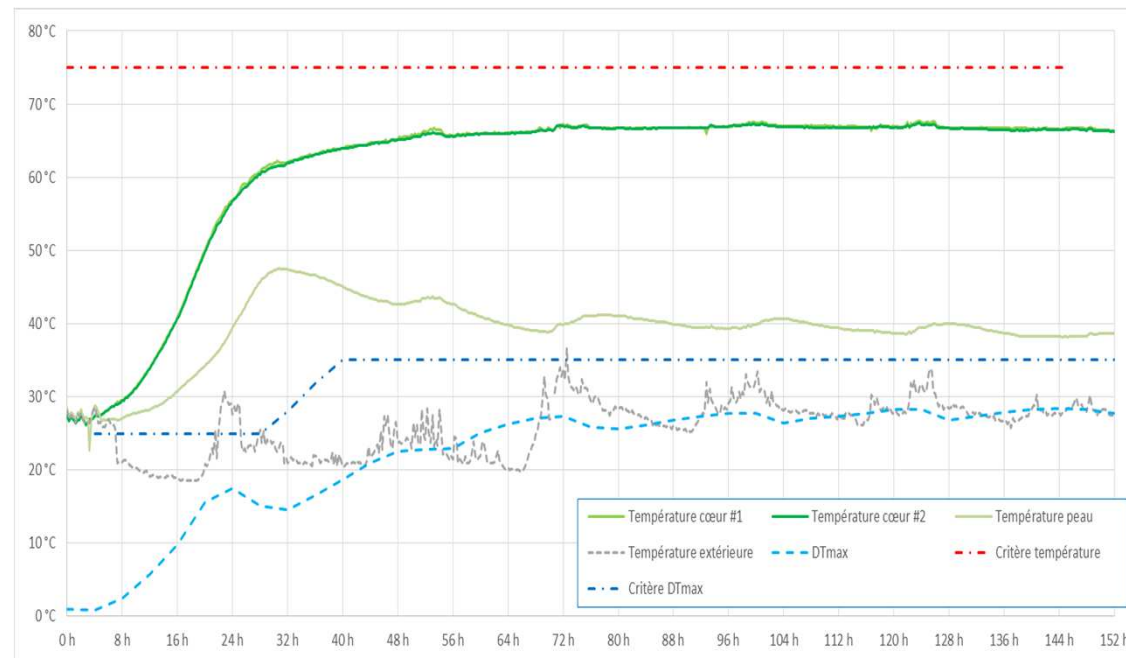
- **Prévention vis-à-vis de Réaction Sulfatique Interne (RSI)**
 - Niveau de prévention Cs/Ds (70/65°C)
 - Essai performance RSI (Méthode LPC 66)
 - Dégagement chaleur liants (Langavant)
 - **Modélisations thermo-numériques**
 - Variation $Q_{\text{ciment}} \rightarrow 3^{\circ}\text{C}$ marge sécurité



Etudes thermiques



- **Risque de fissuration au jeune âge dû à un fort gradient thermique entre cœur et peau**
 - Critère CCTP fixé à 25°C
 - Critère proposé fixé initialement à 25°C puis évolutif dans le temps en fonction de la montée en résistance du béton



■ Laboratoire de chantier:

— Contrôle des constituants:

- ciments (demande eau et temps prise)
- granulats (hors analyse chimique)

— Contrôle des bétons:

- Béton frais (Consistance, T°C, Mv, Air)
- Résistance compression et traction
- Durabilité (P_{eau} , ρ , D_{app} , K_{gaz})

— Contrôles thermiques

- Maturométrie
- Suivi thermique RSI

— Etude complémentaires

- Mortier injection sous embase
- Bétons TAAF, immergé, BAP, corniches
- Colle voussoirs, mortier réparation



■ Etude variabilité indicateurs de durabilité

– Deux bétons étudiés:

- C45/55 XS3 VOUSOIRS : 370 kg CEM II/A-P PM + 35 kg FS et 170 L Eau efficace
- C40/50 XS2 SEMELLES : 390 kg CEM III/A PM-ES et 175 L Eau efficace

– Variabilité temporelle:

- Au moins 15 mesures en 12 mois
- Mesure P_{eau} , D_{app} , K_{gaz} à 90 jours (+ autres échéances D_{app} -> facteur vieillissement)
- Mesure carbonatation accélérée à 90 jours (formule Semelles)

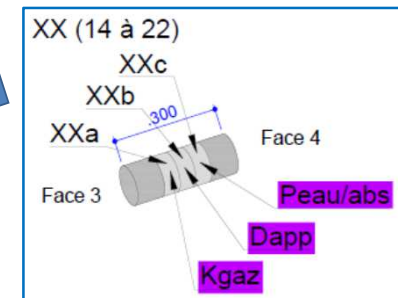
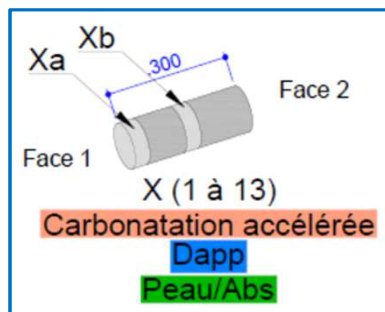
– Etude paramétrique:

- Réalisation de 3 gâchées nominales et 4 dérivées ($\pm 10\text{L}$; $\pm 10\%$ Sable)
- Mesure P_{eau} , D_{app} , K_{gaz} à 90 jours

– Influence de cure et variation spatiale

- Réalisation de deux voiles d'essais
- Mesure sur carottes P_{eau} , D_{app} , K_{gaz} à 90 jours
- Mesure carbonatation accélérée à 90 jours (formule Semelles)

■ Influence de cure et variation spatiale



- **Merci pour votre attention**

