



GC'2017

CACHAN

15 et 16 mars

**INFLUENCE DE LA POROSITÉ DES GRANULATS SUR
LES PROPRIÉTÉS DE DURABILITÉ DES BÉTONS**
**Résultats des investigations menées pour le
projet de la Nouvelle Route du Littoral
à La Réunion**

**Myriam CARCASSES, Frank CASSAGNABERE (LMDC),
François CUSSIGH, Pierre-Edouard DENIS, Lionel LINGER (VINCI),
Jonathan MAI-NHU, Patrick ROUGEAU (CERIB)**

Influence de la porosité des granulats sur les propriétés de durabilité des bétons – investigations menées dans le cadre de la construction de la nouvelle route du littoral sur l'île de La Réunion (France)

Lionel LINGER, Pierre Edouard DENIS

(Vinci Construction Grands Projets, France)

Myriam CARCASSES, Franck CASSAGNABERE

(LMDC, Université de Toulouse, France)

François CUSSIGH

(Vinci Construction France)

Jonathan MAI-NHU, Patrick ROUGEAU

(CERIB, France)



DT-DMTB-2017-052

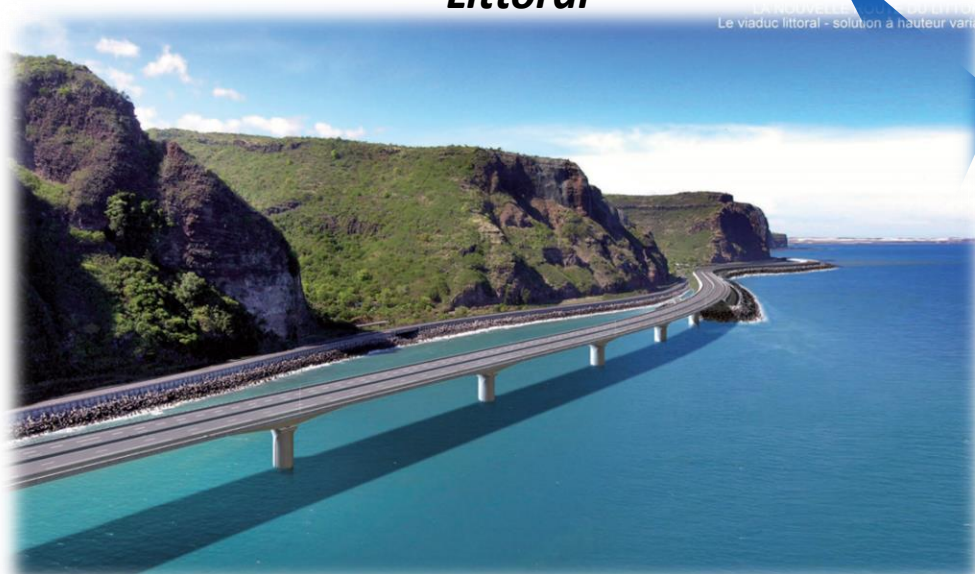
La Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Route du Littoral actuellement



Source : VCGP, Bouygues TP, D&B, DCP

Simulation de la Nouvelle Route du Littoral



Source : VCGP, Bouygues TP, D&B, DCP



Source : VCGP, Bouygues TP, D&B, DCP

Risques d'éboulis de la falaise

Risques de forte houle



Source : VCGP, Bouygues TP, D&B, DCP

Maitre d'ouvrage : Région Réunion

Maitre d'œuvre : Egis

Longueur totale : 12,4 kms

Budget : 1 660 M€

La Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Digue Grande Chaloupe et La Possession

Matériaux digue

17,9 millions de tonnes

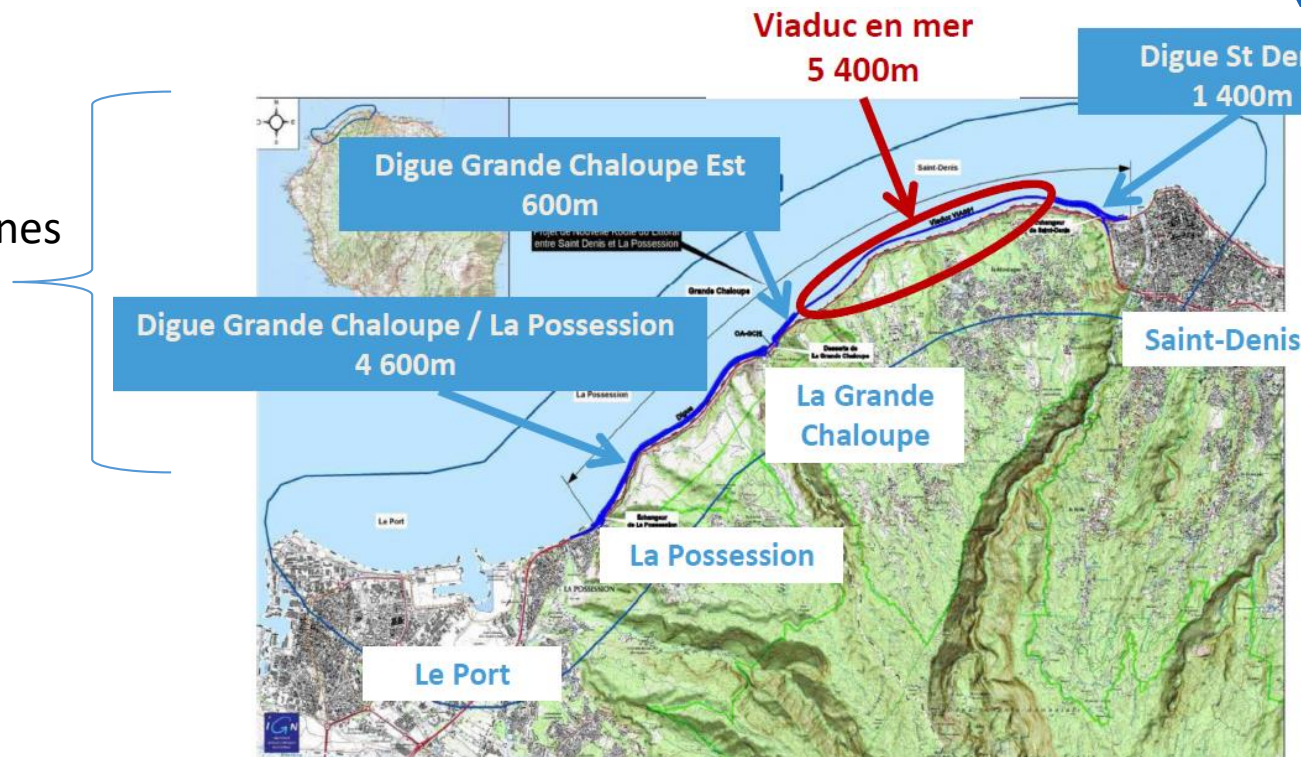
Mur chasse mer

207 000 m³

Acropodes

306 000 m³

42 000 blocs



Source : VCGP, Bouygues TP, D&B, DCP

Groupement de constructeurs Digues et Echangeur de La Possession 6 600 m : GTOI, VCT, SBTPC

Groupement de constructeurs Viaduc 5 400 m : VCGP, Bouygues TP, D&B, DCP

Groupement de constructeurs viaduc 280 m : EIFFAGE/SAIPEM/NGE

La Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

7 viaducs de 769,3 m

330 000 m³ de béton

Travées courantes : 120 m

Hauteur : 7,3 à 8,3 m

50 appuis :

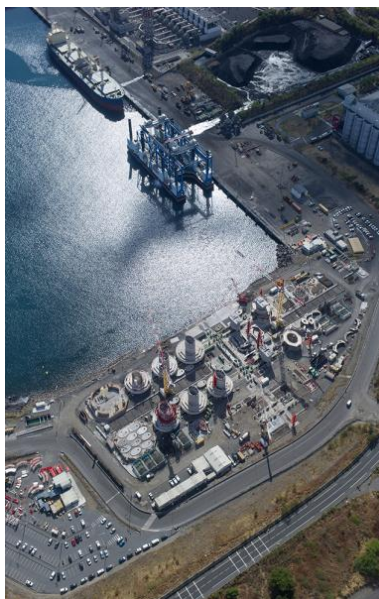
2 culées sur pieux

48 piles – fondations

superficielles \varnothing 20 m / 23 m



Voussoirs sur pile



Site de préfa des piles



Site de préfa des voussoirs



Piles de ponts

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Approche performantielle de la durabilité

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.

Classes d'exposition des différents bétons

Viaduc : XS2 à XS3, XA2

Digues : XS3

Indicateurs de durabilité considérés

Perméabilité au gaz

Porosité accessible à l'eau

Coefficient apparent de diffusion des ions chlorure

k_{gaz}

P_{eau}

D_{app}



Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Contexte normatif et problématique

Exigences du fascicule 65 du CCTG



Disponibilité locale des constituants



Spécificité du climat sur l'île de La Réunion

Fascicule 65 – durée de vie des ouvrages 100 ans et seuils de performances

$$P_{\text{eau}, 90 \text{ jours}} = 13 \%$$

$$k_{\text{gaz}, 90 \text{ jours}} = 2.10^{-16} \text{ m}^2$$

$$D_{\text{app}, 90 \text{ jours}} = 3,5.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s} / 7.10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

Température
Humidité relative

Prévenir tout désordre lié à la :

- RAG
- RSI
- Fissuration précoce et à long terme
- Corrosion des armatures

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

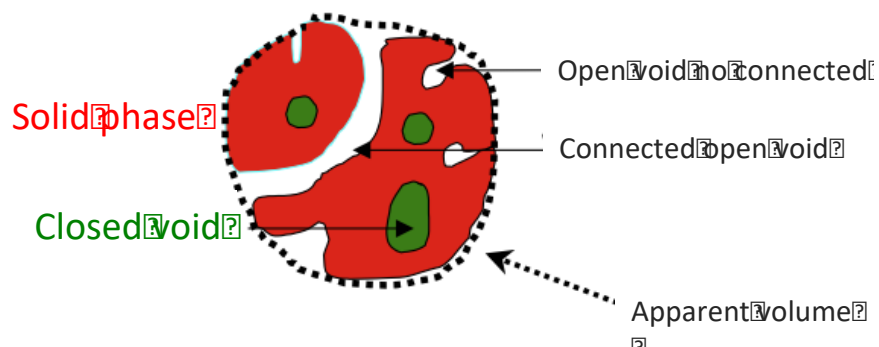
Contexte normatif et problématique

Spécifications requises initialement pour les bétons de la NRL

	Porosité accessible à l'eau (%)	Coefficient de diffusion apparent des ions chlorure ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	Perméabilité au gaz ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$)	Perméabilité à l'eau liquide ($\times 10^{-18} \text{ m}^2$)
Zones immergées en permanence	≤ 12	≤ 5	N.A	N.A
Zones de marnage	≤ 10	≤ 2	≤ 100	≤ 0.05
Zones soumises aux éclaboussures	≤ 10	≤ 2	≤ 100	≤ 0.05
Zones exposées aux sels marins	≤ 11	≤ 3	≤ 100	≤ 0.05

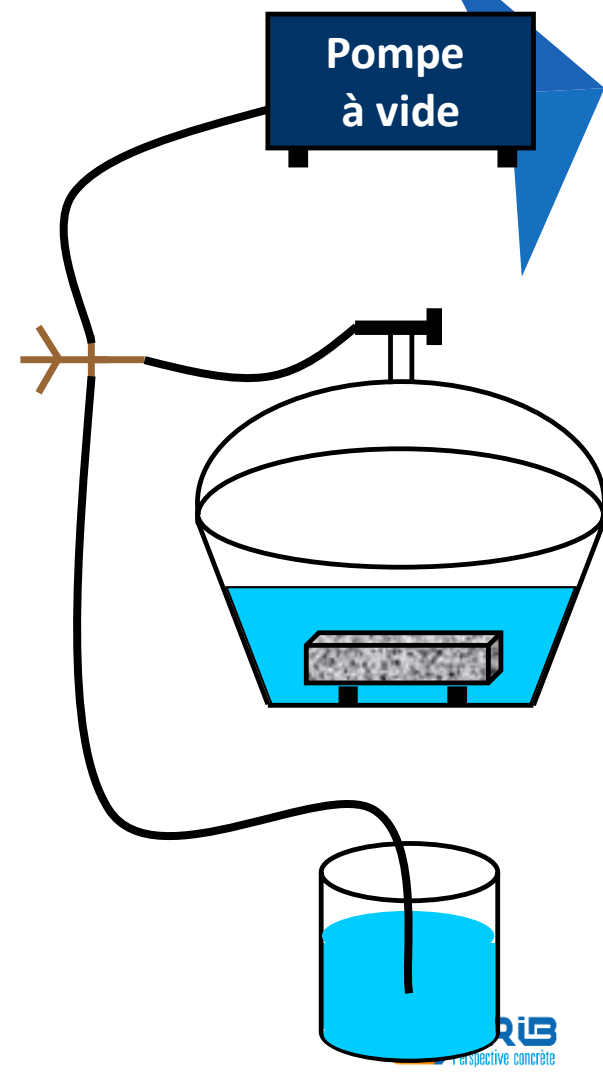
Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Porosité accessible à l'eau et protocole d'essais associés (NF P 18-459)



Imbibition du corps d'épreuve

- Placer le corps d'épreuve dans un récipient étanche
- Faire le vide jusqu'à pression constante de 25 mbars
- Maintenir le vide pendant 4 heures \pm 15 minutes
- Introduire de l'eau d'immersion (recouvrir le corps d'épreuve de 20 mm d'eau)
- Maintenir la pression réduite pendant 44 \pm 1 heures à 20 \pm 2°C



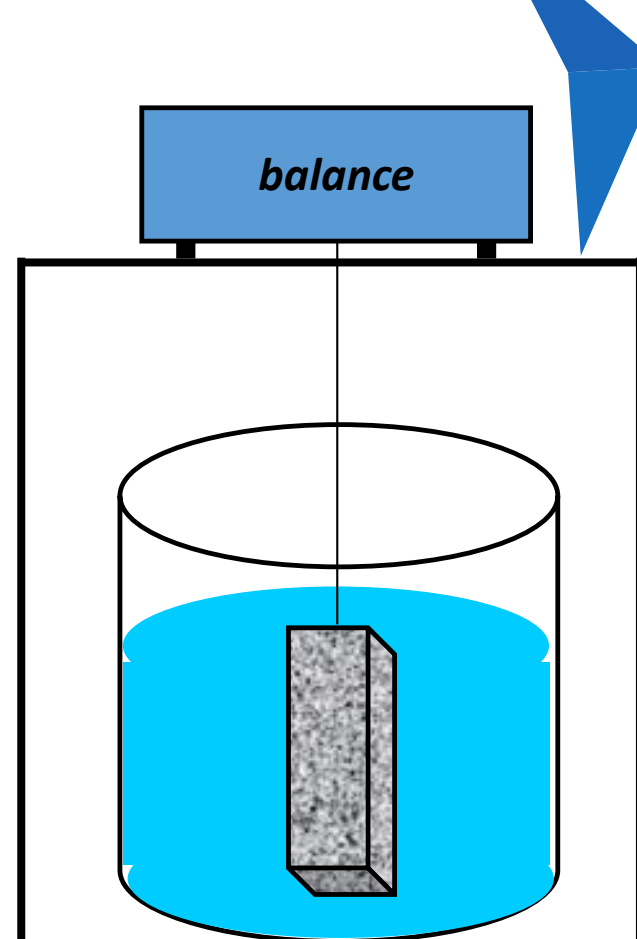
Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Porosité accessible à l'eau et protocole d'essais associés

Détermination des masses du corps d'épreuve immergé dans l'eau, dans l'air et séché

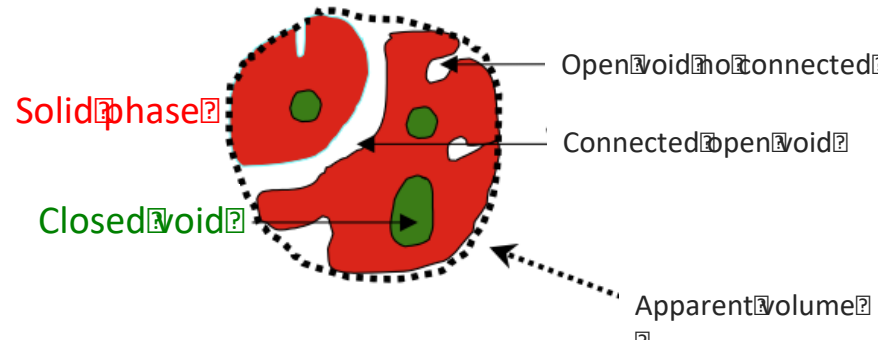
- > Suspendre le corps d'épreuve à partir du système de suspension de la balance
- > Peser le corps d'épreuve complètement immergé dans l'eau (déterminer la T° de l'eau)
→ M_{eau}
- > Peser le corps d'épreuve dans l'air (après l'avoir essuyé soigneusement sans retirer l'eau des pores)
→ M_{air}
- > Sécher le corps d'épreuve à 105°C jusqu'à masse constante. (le corps d'épreuve est placé en dessiccateur jusqu'à T° ambiante).
→ M_{sec}

(ce temps de séchage peut être parfois long en fonction de la compacité des bétons testés)



Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Porosité accessible à l'eau et protocole d'essais associés



Masse volumique apparente

$$\rho = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}}$$

Porosité accessible à l'eau

$$\varepsilon = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100$$

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Influence des propriétés intrinsèques des granulats sur la porosité accessible à l'eau

Taux de substitution	Dimensions des granulats (mm)	Absorption d'eau (%)	R _c (MPa)	Porosité accessible à l'eau (%)
(Nguyen, 2013)				
0 % (Ref)	0/10	1,0 %	41,2	12,3 ± 0,2
10 % de granulats secs	0/8	8,2 %	38,1	14,5 ± 0,8
10 % granulats imbibés	0/8	8,2 %	43,2	15,0 ± 0,3
(Nguyen, 2014)				
0 % (Ref)	0/ 4 & 4/10	0,9 % NA & 0,6 % NS	66,7	15,6 ± 0,4
10 % (65 % GR + 35 % SR)	0/4 & 4/10	6,1 % RA & 9,3 % RS	64,6	15,9 ± 0,1
(Cassagnabère, 2013)				
0 % (Ref)	0/4	0,2 %	61,6	17,2 ± 0,4
5 %	0/4	8,5 %	58,1	17,5 ± 0,3
10 %	0/4	8,5 %	56,9	17,6 ± 0,5
15 %	0/4	8,5 %	56,2	18,1 ± 0,3
30 %	0/4	8,5 %	54,4	19,5 ± 0,2

RS : Sable recyclé, RA : Gravillon recyclé, NS : Sable naturel, NA : Gravillon naturel

[Nguyen, 2014] Nguyen VN,, Rapport d'activité sur une étude SEAC, Document interne LMDC, 2014,

[Nguyen et al., 2013] Nguyen VN,, Mouret M, Cassagnabère F., Lachemi M., Bertrand A., Performantial approach of recycled aggregate incorporation in steam-cured SCC design for precast use, NOCMAT 2013, Brazil,

[Cassagnabère et al., 2013] Cassagnabère F., Mouret M., Lachemi M., Escadeillas G., Rakotoarimanga A., Bertrand A., Impact du taux de substitution de sable recyclé sur les propriétés d'un mortier étuvé, NOMAD 2012, Toulouse, France,

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Influence des propriétés intrinsèques des granulats sur la porosité accessible à l'eau

Porosité de la pâte cimentaire en fonction du rapport E/C, modèle de Powers (2004) :

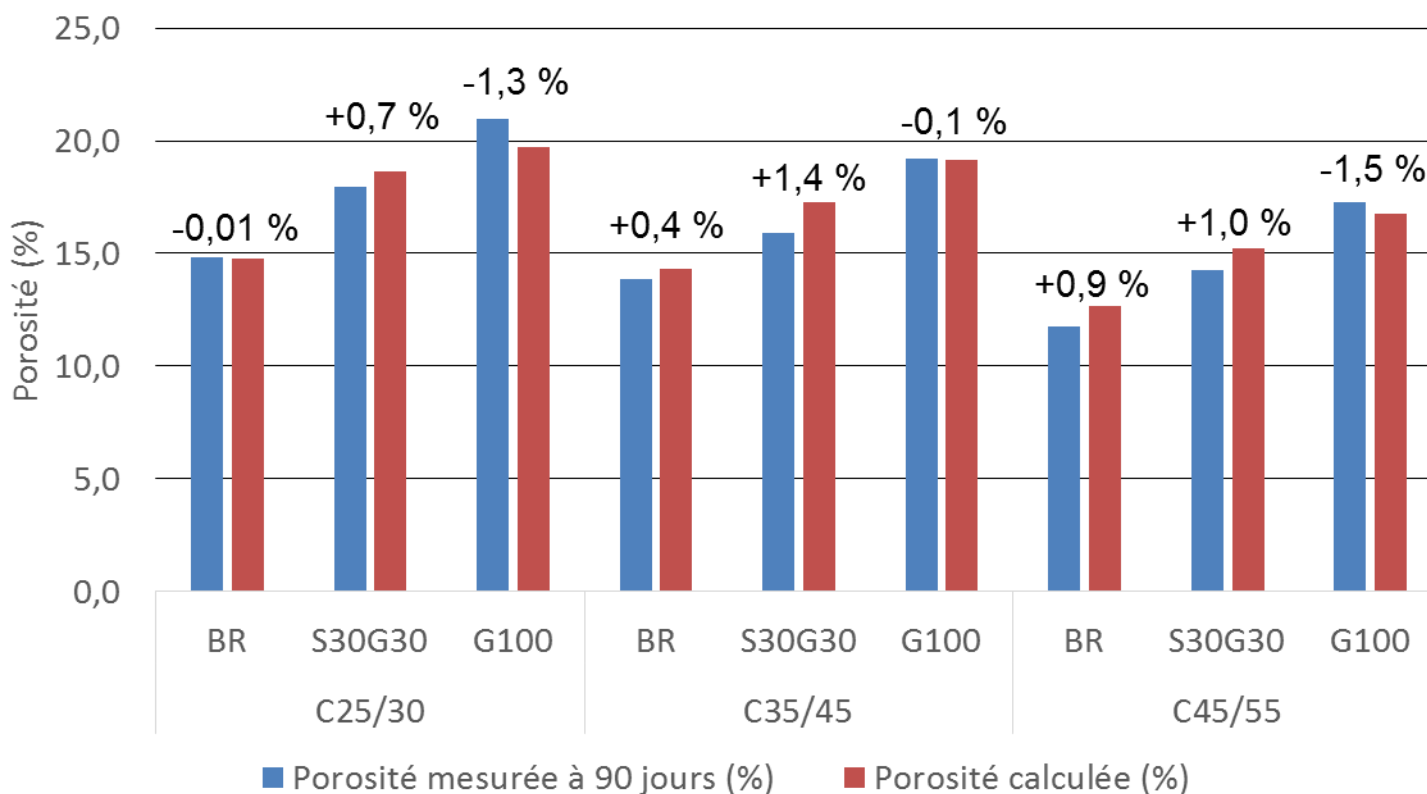
$$p_{p\grave{a}te} = \frac{\frac{E_{eff}}{C}}{\frac{E_{eff}}{C} + 0,32} - 0,53 \cdot \alpha \left(1 - \frac{\frac{E_{eff}}{C}}{\frac{E_{eff}}{C} + 0,32} \right)$$

Avec α le taux d'hydratation du ciment calculé grâce à la formule de Waller (1999) :

$$\alpha = 1 - e^{\left(-3,3 \frac{E_{eff}}{C} \right)}$$

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

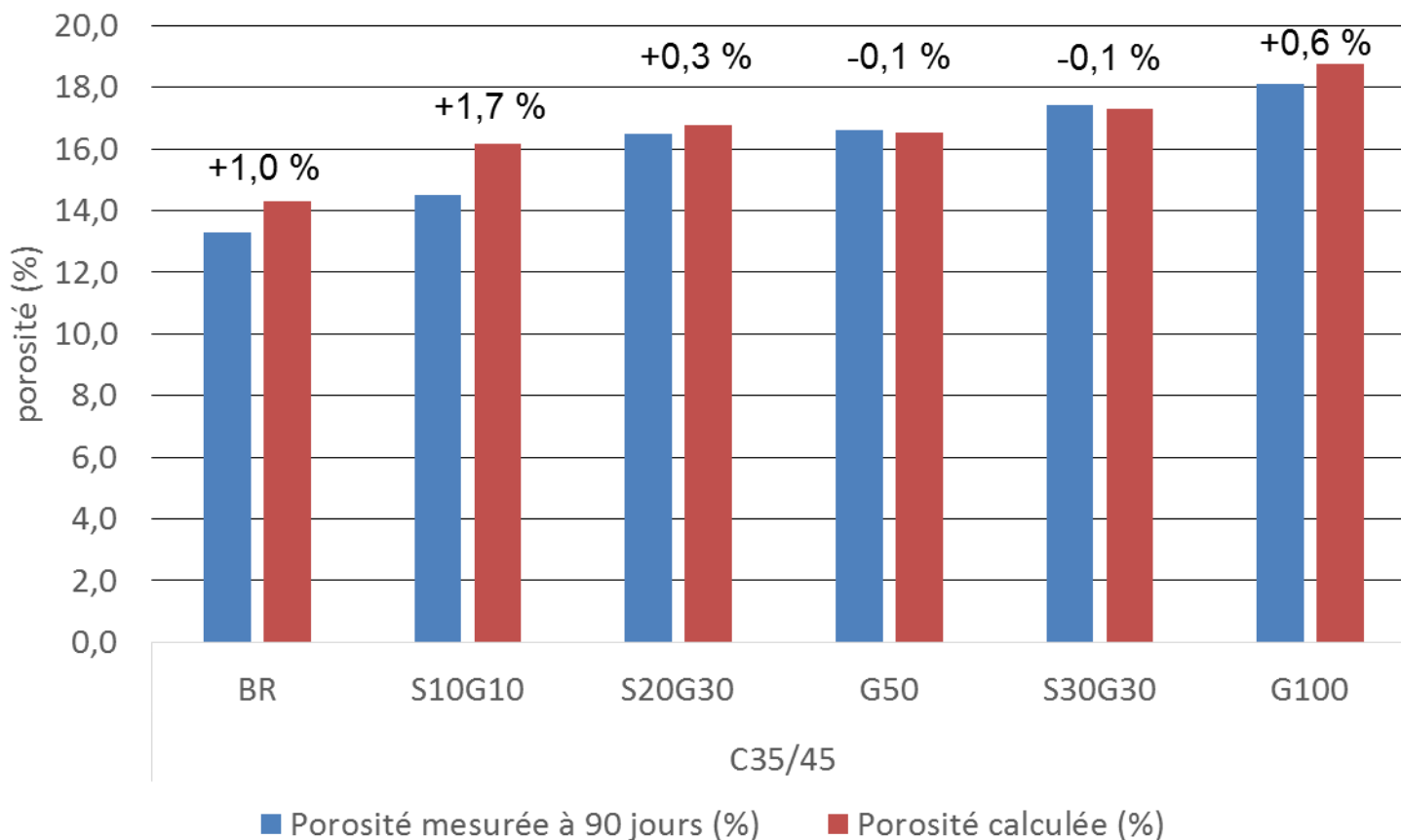
Influence des propriétés intrinsèques des granulats sur la porosité accessible à l'eau



Possibilité d'appréhender l'augmentation de la porosité accessible à l'eau mesurée en fonction de l'augmentation de la porosité due à l'introduction de granulats recyclés (Résultats RECYBETON)

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Influence des propriétés intrinsèques des granulats sur la porosité accessible à l'eau



Possibilité d'appréhender l'augmentation de la porosité accessible à l'eau mesurée en fonction de l'augmentation de la porosité due à l'introduction de granulats recyclés (Résultats RECYBETON)

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

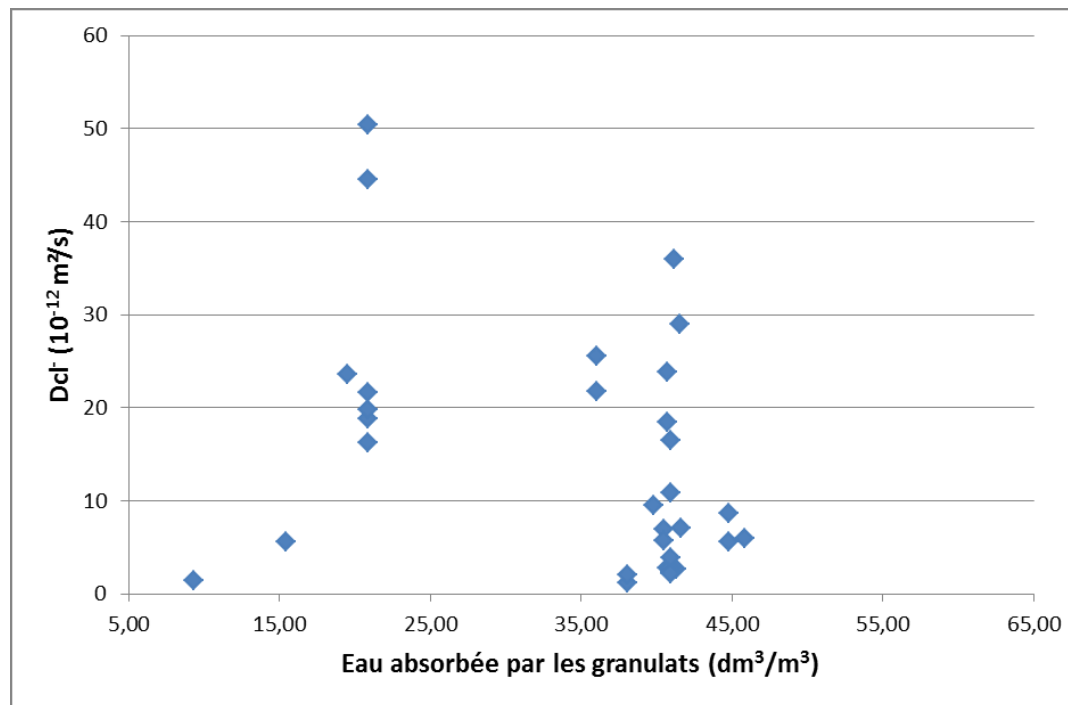
Influence des propriétés intrinsèques des granulats sur la porosité accessible à l'eau

En considérant une masse volumique de l'ordre de $2\,700\text{ kg/m}^3$ et un coefficient d'absorption d'eau mesuré à 24 h de l'ordre de 2,5 %, la porosité des granulats peut être évaluée à environ 6,8 %. En considérant le béton comme étant constitué d'un volume de pâte de l'ordre de 30 % et d'une fraction volumique des granulats de l'ordre de 70 %, la porosité globale du matériau peut être évaluée à **environ 16,5 %**.

Considérons le même béton mais réalisé à partir de granulats « traditionnels » utilisés en métropole présentant un coefficient d'absorption d'eau de l'ordre de 1 % et de masse volumique moyenne de $2\,700\text{ kg/m}^3$. La porosité des granulats peut être évaluée à environ 2,7 %. En considérant les mêmes volumes de pâte (30 %) et de granulats (70 %), la porosité globale du matériau peut être évaluée à **environ 13,7 %**, soit presque 3 % de moins en valeur absolue.

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Influence des propriétés intrinsèques des granulats sur le coefficient de diffusion des ions chlorure



Evolution du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en fonction de l'eau absorbée par les granulats

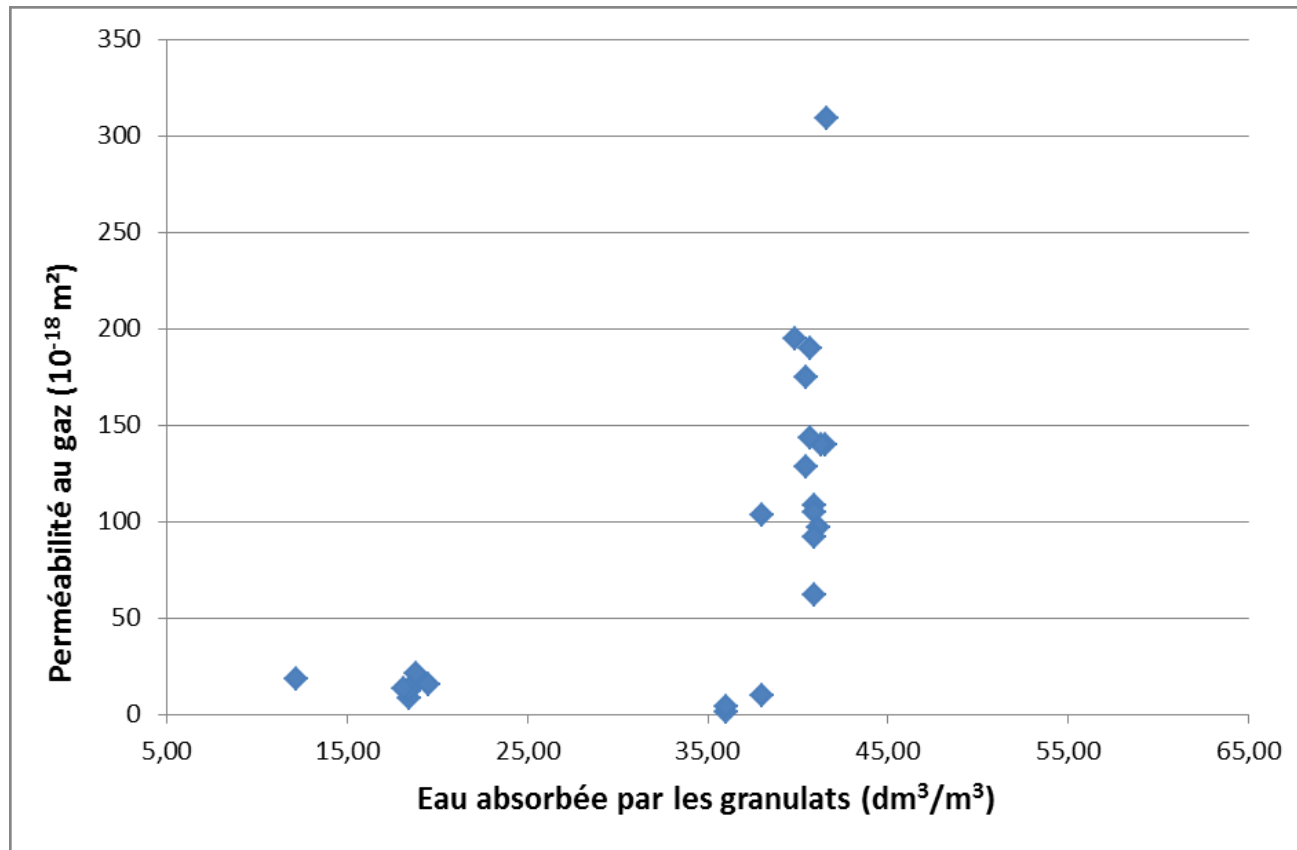
[Nguyen, 2014] Nguyen VN,, Rapport d'activité sur une étude SEAC, Document interne LMDC, 2014,

[Nguyen et al., 2013] Nguyen VN,, Mouret M, Cassagnabère F., Lachemi M., Bertrand A., Performantial approach of recycled aggregate incorporation in steam-cured SCC design for precast use, NOCMAT 2013, Brazil,

[Cassagnabère et al., 2013] Cassagnabère F., Mouret M., Lachemi M., Escadeillas G., Rakotoarimanga A., Bertrand A., Impact du taux de substitution de sable recyclé sur les propriétés d'un mortier étuvé, NOMAD 2012, Toulouse, France,

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

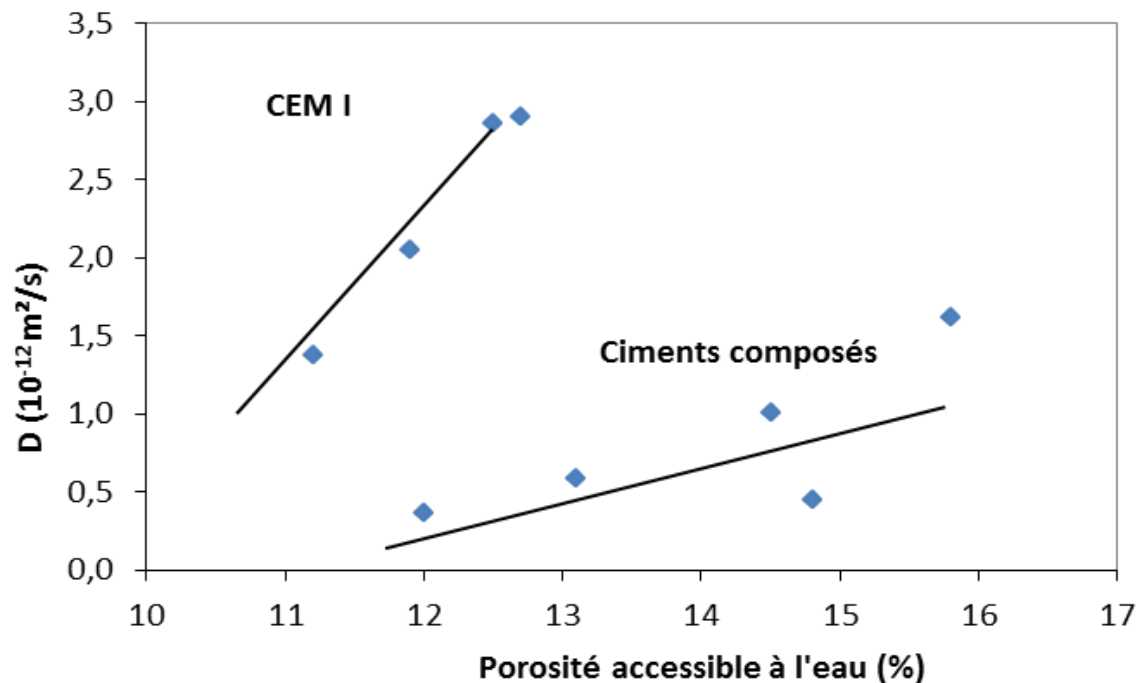
Influence des propriétés intrinsèques des granulats sur la perméabilité au gaz



Evolution de la perméabilité au gaz en fonction de l'eau absorbée par les granulats

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

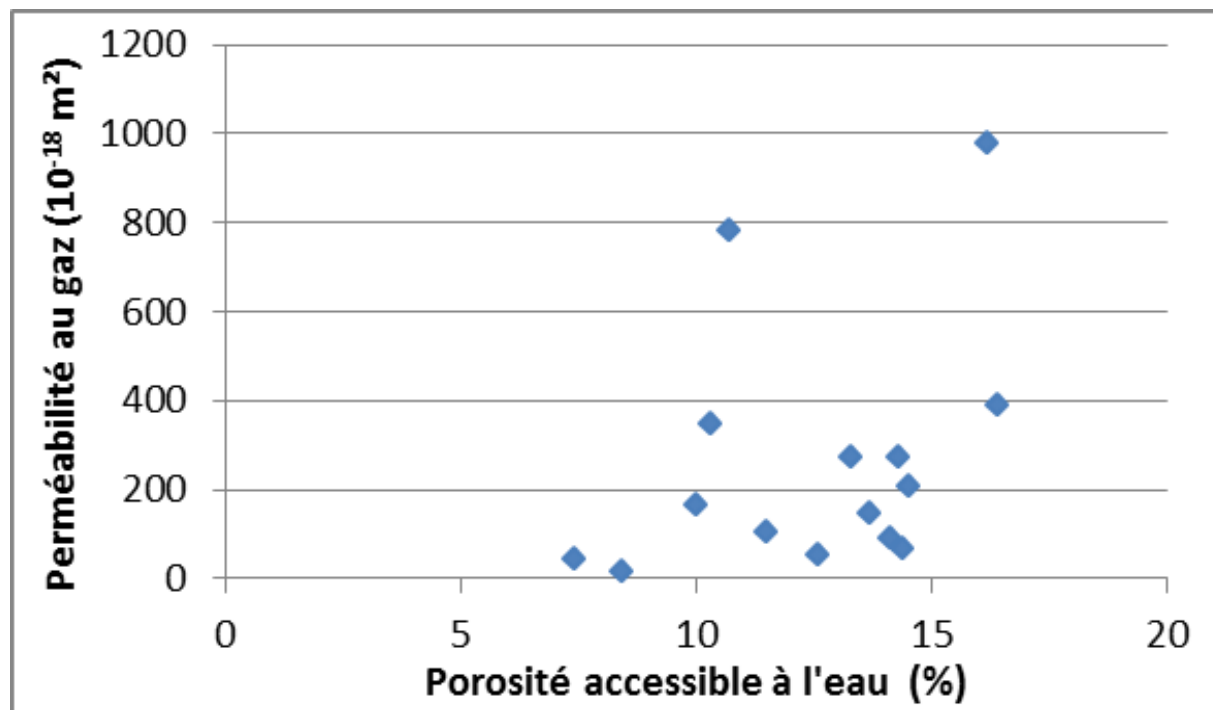
Lien entre la porosité accessible à l'eau des bétons et le coefficient de diffusion des ions chlorure



Evolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction de la porosité accessible à l'eau [Chlortest 2006]

Durabilité des bétons de la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion

Lien entre la porosité accessible à l'eau des bétons et la perméabilité au gaz



*Evolution de la perméabilité au gaz en fonction de la porosité accessible à l'eau
[BHP2000, 2003]*

Conclusions

- La porosité accessible à l'eau est un indicateur de durabilité utile en première approche et dans le cadre d'un contrôle de la régularité des bétons durant la construction, Il n'apparaît cependant pas pertinent à lui seul pour appréhender correctement les risques de corrosion
- Importance du coefficient de diffusion des ions chlorure pour appréhender la problématique de corrosion des armatures → paramètre d'entrée des modèles prédictifs
- Modèle simplifié de porosité accessible à l'eau permet d'appréhender l'augmentation de la porosité accessible à l'eau mesurée en fonction de l'augmentation de la porosité due à l'introduction de granulats présentant une porosité non traditionnelle
- Travaux AFGC sur la mise en place de la base de données Durabilité