

# **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**

## ***INFLUENCE OF AGGREGATES POROSITY ON CONCRETE OVERALL DURABILITY – OUTCOMES OF INVESTIGATIONS CARRIED OUT FOR THE NEW COASTAL ROAD ON LA REUNION ISLAND MAJOR PROJECT***

---

**Lionel LINGER<sup>(1)</sup>, Pierre Edouard DENIS<sup>(1)</sup>,  
Myriam CARCASSES<sup>(2)</sup>, Franck CASSAGNABERE<sup>(2)</sup>, François CUSSIGH<sup>(3)</sup>  
Jonathan MAI-NHU<sup>(4)</sup>, Patrick ROUGEAU<sup>(4)</sup>**

<sup>(1)</sup>VINCI Construction Grands Projets, Rueil, France

<sup>(2)</sup>LMDC, Toulouse, France

<sup>(3)</sup>VINCI Construction France, Nanterre, France

<sup>(4)</sup>CERIB, Epernon, France

---

# 1. INTRODUCTION

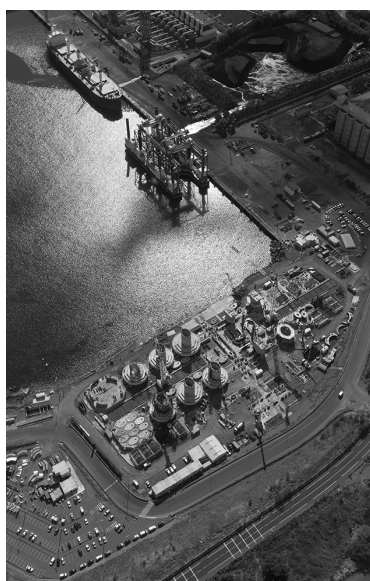
Sur l'île de La Réunion, la RN 1 entre Saint Denis et La Possession dite Route du Littoral est soumise à de forts aléas naturels, géologiques et maritimes, des chutes de pierres et des grands éboulements malgré les opérations de sécurisation en falaise. Une Nouvelle Route du Littoral est en construction, plus éloignée de la falaise et redimensionnée pour résister à des houles cycloniques centennales (maitre d'ouvrage : Région Réunion ; Maitre d'œuvre : Egis). Longue d'environ 12 km, la Nouvelle Route du Littoral est notamment composée du plus long viaduc en mer de France (5,4 km) et de quatre tronçons de digues (3,6 km) dont la hauteur atteint une vingtaine de mètres. Ces digues sont protégées par 42 000 accropodes. Le volume total de béton nécessaire à la construction des digues est de l'ordre de 550 000 m<sup>3</sup>.

Concernant le viaduc, la solution technique retenue par le groupement de constructeurs consiste à réaliser 95 % de l'ouvrage à l'aide d'éléments préfabriqués (≈330 000 m<sup>3</sup> de béton), pour la plupart acheminés par voie maritime.

La pénétration des ions chlorure est un des principaux phénomènes responsable de la corrosion des armatures et de la dégradation des structures en béton armé. L'action des ions

chlorure est particulière à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton, comme les ouvrages situés en site maritime. En présence de chlorures, la dépassement des aciers est initiée lorsque le front de pénétration des chlorures a traversé le béton d'enrobage et atteint le premier lit d'armatures en quantité suffisante pour détruire la couche passive protectrice qui se forme naturellement sur l'acier dans un béton sain. Lorsque l'armature est dépassivée, la corrosion peut s'initier et se propager en présence d'eau et d'oxygène.

Pour les projets de grande envergure, tel que la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de La Réunion, les spécifications des bétons reposent de plus en plus sur le fait que les bétons doivent être dimensionnés pour satisfaire les exigences de durée de vie exigées dans le cahier des charges, et non uniquement sur des exigences basées sur des résistances mécaniques. La norme NF EN 206/CN autorise l'utilisation d'une approche performantielle de la durabilité pour la formulation de béton durable même si le déploiement de l'approche nécessite d'être davantage détaillé. En France, le fascicule 65 propose une méthodologie pour utiliser l'approche performantielle basée sur des essais de performance ou des indicateurs de durabilité associés à des valeurs seuils en fonction de la classe d'exposition considérée.



**Figure 1a : Vue aérienne Préfa Appuis (Crédits photos : Viaduc Littoral / Sébastien Marchal)**



**Figure 1b : Vue aérienne Préfa Voussoirs (Crédits photos : Viaduc Littoral / Sébastien Marchal)**



**Figure 1c : Méga-barge « Zourite » utilisée pour l'installation des piles de pont (Crédits photos : Viaduc Littoral / Sébastien Marchal)**



**Tableau 1 : Spécifications requises initialement pour les bétons de la NRL**

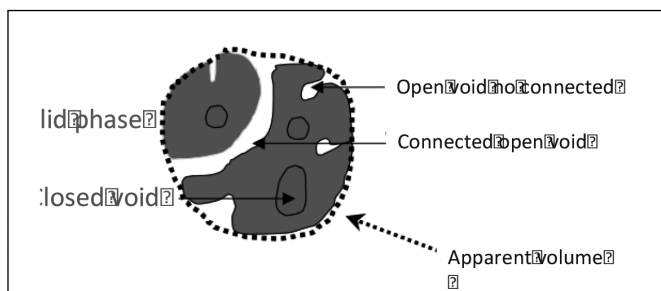
	Porosité accessible à l'eau (%)	Coefficient de diffusion apparent des ions chlorure ( $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ )	Perméabilité au gaz ( $\times 10^{-18} \text{ m}^2$ )	Perméabilité à l'eau liquide ( $\times 10^{-18} \text{ m}^2$ )
Zones immergées en permanence	$\leq 12$	$\leq 5$	N.A	N.A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

Les spécifications requises initialement pour les bétons de la NRL étaient dérivés du guide [AFGC, 2014] et sont synthétisées dans le tableau 1. Ces spécifications ont été revues suite à des études expérimentales et de modélisation approfondies concernant la durabilité des bétons réalisés avec les granulats disponibles sur l'île de La Réunion [Mai-Nhu *et al.*, 2015, Linger *et al.*, 2017].

Dès les premières fabrications et même pendant la phase de réponse à l'appel d'offres, la problématique de la qualité intrinsèque des granulats a été abordée. L'utilisation de ces granulats n'est pas compatible avec les exigences de porosité accessible à l'eau à respecter sur béton durci. D'un autre côté, il était inenvisageable de considérer l'option qui consiste à importer plus d'un million de tonnes de granulats. Un des enjeux majeurs de ce projet repose donc sur l'utilisation des granulats localement disponibles, présentant une porosité vacuolaire importante, pour dimensionner des bétons durables (de rapport  $E_{\text{eff}}/C < 0,45$ ) et dont les performances à long termes sont compatibles avec les exigences de durée d'utilisation du projet dans des conditions environnementales sévères en termes d'humidité relative et de température.

## 2. POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU ET PROTOCOLES D'ESSAIS ASSOCIÉS

La porosité du béton est définie par le rapport entre le volume des vides et le volume apparent du matériau : on parle alors de porosité totale. On peut également distinguer les vides en fonction de leur accessibilité. On définit alors une porosité accessible ou non : la porosité totale est donc la somme de la porosité accessible (ou ouverte) et de la porosité non accessible, ou fermée (figure 2). La porosité ouverte intrinsèque



**Figure 2 : Schématisation du réseau poreux (2D)**

des granulats et l'absorption d'eau sont des grandeurs qui sont liées et qui appréhendent les mêmes caractéristiques.

La mesure décrite dans la norme NF P 18-459 consiste à saturer l'échantillon en le disposant dans un dessiccateur et à faire le vide (typiquement  $\leq 25$  mbars). Ce vide est maintenu pendant 4 heures. On introduit alors progressivement l'eau jusqu'à recouvrir l'échantillon d'environ 20 mm d'eau. Le vide est alors maintenu pendant 44 heures supplémentaires. On peut alors déconnecter la pompe et sortir l'échantillon du dessiccateur.

On détermine la masse de l'échantillon dans l'eau en le déposant dans une nacelle immergée elle-même suspendue à une balance : on obtient  $M_{\text{eau}}$ .

On pèse ensuite dans l'air ce même échantillon saturé en eau après l'avoir essuyé à l'aide d'un linge humide pour le débarrasser du film superficiel d'eau sans retirer l'eau des pores : on obtient  $M_{\text{air}}$ .

On mesure enfin la masse sèche de l'échantillon qui a été séché à l'étuve à  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives séparées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0,05 % : on obtient  $M_{\text{sec}}$ .

La porosité accessible à l'eau est calculée à partir de l'équation suivante :

$$p = \frac{M_{\text{air}} - M_{\text{sec}}}{M_{\text{air}} - M_{\text{eau}}} \cdot 100$$

L'obtention de la masse sèche constante peut conduire à un séchage très long en étuve dans le cas des bétons très compacts et réalisés à base de granulats poreux. Ce temps de séchage à  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  peut augmenter le risque de développement de microfissuration. Les mêmes observations peuvent être réalisées dans le cas de l'essai de perméabilité au gaz. En effet la stabilisation de la perte de masse lors du séchage à  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  est difficile à obtenir pour les bétons fabriqués sur l'île de La Réunion comparativement aux bétons réalisés avec des granulats plus traditionnels disponibles en métropole. Cela conduit à augmenter fortement la dispersion des résultats d'essais. Dans certains cas, et pour l'ensemble des laboratoires participants aux étapes de qualification et de suivi de production, il arrive que le résultat d'essai mesuré à 90 jours soit supérieur à celui obtenu à 28 jours ce qui ne paraît pas réaliste. Ces résultats aberrants sont probablement dus à la phase de séchage trop longue qui conduit au développement de microfissures dans la matrice cimentaire.

### 3. INFLUENCE DES PROPRIÉTÉS INTRINSEQUES DES GRANULATS SUR LES PRINCIPAUX INDICATEURS DE DURABILITÉ

#### 3.1. Sur la porosité accessible à l'eau

La plupart des granulats naturels utilisés dans la formulation des bétons présentent des porosités faibles et sont donc considérés à juste titre comme des inclusions imperméables au sein du matériau. Ils ne participent donc pas ou très peu à la porosité du béton et a fortiori aux transferts. En revanche lorsqu'on utilise des granulats qui présentent des porosités importantes, comme ceux utilisés sur l'île de La Réunion (coefficient d'absorption d'eau supérieur à 2 %) ou des granulats recyclés (WA24 > 5 %), la porosité apparente du béton augmente de manière non négligeable. Même si la porosité des granulats est estimée à partir du coefficient d'absorption d'eau, ce paramètre n'est pas représentatif de la porosité totale interconnectée car ce coefficient est mesuré expérimentalement à 24 heures.

De nombreux résultats issus de la littérature ont mis en évidence que la porosité des granulats a une influence importante sur la porosité des bétons. Dans les études [Cassagnabère, 2013, Nguyen, 2013, 2014], les résultats montrent que l'utilisation de granulats recyclés (WA24 > 5 % pour les gravillons recyclés et WA24 > 8 % pour le sable) présentant une porosité intrinsèque plus élevée que celle des granulats traditionnels (WA24 < 1 %) augmente la porosité du béton (Table 2).

Les granulats ne peuvent pas être considérés comme des inclusions solides sans vide : leur porosité intrinsèque impacte celle des bétons et cela quel que soit le type de granulats considérés. Prendre en compte la porosité de ces granulats est primordiale lorsqu'on cherche à estimer la porosité des bétons.

En première approximation, il est possible d'estimer la porosité de la pâte cimentaire en fonction du rapport E/C selon le modèle de Powers [Taylor 2004].

$$P_{pâte} = \frac{\frac{E_{eff}}{C}}{\frac{E_{eff}}{C} + 0,32} - 0,53 \cdot \alpha \left( 1 - \frac{\frac{E_{eff}}{C}}{\frac{E_{eff}}{C} + 0,32} \right)$$

Où  $\alpha$  représente le degré d'hydratation théorique maximal calculé par la formule de Waller [Waller, 1999].

Cette relation permet d'aboutir par exemple à une porosité de la pâte cimentaire de l'ordre de 39 % pour un béton dont le rapport E/C est égal à 0,42.

La porosité apportée par les granulats pourrait être estimée à partir des valeurs de coefficient d'absorption d'eau et de leur masse volumique. En considérant une masse volumique de l'ordre de 2 700 kg/m<sup>3</sup> 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 kg/m<sup>3</sup>. 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.

Ce modèle simplifié a été testé avec succès dans le cadre du projet national Recybéton pour estimer la porosité des bétons

**Tableau 2 : Porosité accessible à l'eau mesurée sur des bétons recyclés**

Taux de substitution	Dimensions des granulats (mm)	Absorption d'eau (%)	R <sub>c</sub> (MPa)	Porosité accessible à l'eau (%)
<b>(Nguyen, 2013)</b>				
0 % (Ref)	0/10		41,2	12,3 ± 0,2
10 % de granulats secs	0/8		38,1	14,5 ± 0,8
10 % granulats imbibés	0/8		43,2	15,0 ± 0,3
<b>(Nguyen, 2014)</b>				
0 % (Ref)	0/ 4 & 4/10		66,7	15,6 ± 0,4
10 % (65 % GR + 35 % SR)	0/4 & 4/10		64,6	15,9 ± 0,1
<b>(Cassagnabère, 2013)</b>				
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

confectionnés avec des granulats recyclés présentant des valeurs de porosité importantes. La comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations montre que ce modèle fonctionne aussi bien pour les bétons traditionnels que pour les bétons recyclés.

Appliqué aux bétons de la NRL, ce modèle démontre qu'il n'est pas possible d'envisager une porosité accessible à l'eau de l'ordre de 13 % lorsqu'on introduit des granulats naturels disponibles sur l'île de La Réunion, même en considérant un faible rapport  $E_{eff}/C$ .

### 3.2. Sur les autres indicateurs

A l'échelle des mortiers (Cassagnabère, 2013), à l'échelle d'un béton de prédalle (Nguyen, 2014), à l'échelle d'un béton de structure (Nguyen, 2013), ces trois études ont montré que malgré l'augmentation de la porosité du matériau engendrée par une croissance de la porosité de la phase granulaire, les propriétés de transfert traditionnellement associées à la durabilité ne semblent pas affectées.

Le rôle des granulats poreux sur le coefficient de diffusion des ions chlorure peut être mis en évidence en étudiant l'évolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction de l'eau absorbée par les granulats (figure 3). On voit apparaître très distinctement deux familles de bétons : l'une correspondant à une faible absorption d'eau des granulats (environ 20  $dm^3/m^3$ ) et l'autre pour une gamme plus élevée d'absorption des granulats qui correspond à une forte porosité (environ 40  $dm^3/m^3$ ). Dans les deux cas, on observe une variation importante du coefficient de diffusion à quantité d'eau égale. Cela montre bien que l'on peut obtenir des bétons performants et résistants vis-à-vis de la diffusion des espèces agressives pour les deux familles de granulats considérées à savoir « classique » et « très poreux ». Outre évidemment la nature du liant et le rapport « Eau efficace / Liant », la géométrie et la répartition spatiale de la porosité jouent très certainement un rôle dans les transferts.

Lorsqu'on s'intéresse à l'évolution de la perméabilité en fonction de l'eau absorbée par les granulats, on retrouve la même répartition en deux familles que pour le coefficient de diffusion (figure 4). Cependant, pour la première famille

la perméabilité varie peu alors que dans le second cas, on observe une large gamme de perméabilité. Ces résultats montrent là aussi que l'on peut obtenir des bétons performants (dans une gamme de 100 à 200.10<sup>-18</sup> m<sup>2</sup>) du point de vue du transfert malgré une porosité importante liée aux granulats, mais que la perméabilité au gaz d'un béton formulé avec des granulats présentant une forte absorption restera globalement supérieure à celle d'un béton utilisant des granulats peu poreux.

## 4. LIENS ENTRE LA POROSITÉ ACCESSIBLE À L'EAU ET LES AUTRES INDICATEURS DE DURABILITÉ

### 4.1. Coefficient de diffusion des ions chlorure

De nombreuses études dans la littérature, dont [Chlortest, 2006], ont montré que le coefficient de diffusion des ions chlorure peut évoluer pour des bétons présentant pourtant des porosités accessibles à l'eau identiques. Dans la plupart des cas, la nature du liant est le paramètre qui influe le plus sur le coefficient de diffusion des ions chlorure.

Quelques résultats de [Chlortest, 2006] sont présentés sur la figure 5. On constate que les deux familles de liants conduisent à des comportements différents : à même porosité, les bétons à base de ciment composé présentent des coefficients de diffusion significativement plus faibles que ceux des bétons à base de CEM I. De même, l'observation des pentes des courbes montrent qu'une faible variation de la porosité d'un béton formulé avec un CEM I conduit à une relative forte variation du coefficient de diffusion (x2 lorsque la porosité passe de 11 à 13 %) tandis que ce dernier montre la même augmentation relative pour une gamme de porosité s'étalant de 12 à 16 %. En effet, comme on l'a vu précédemment l'utilisation d'additions de type pouzzolaniques ou laitiers conduit à raffiner la porosité de la pâte de ciment hydratée, ralentissant le transfert des ions chlorure.

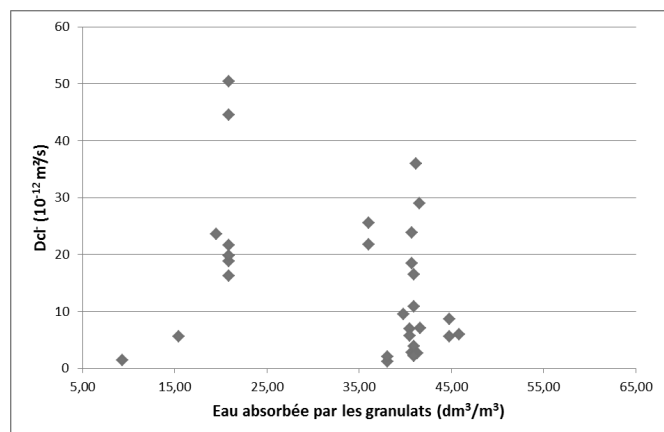


Figure 3 : Evolution du coefficient de diffusion apparent des ions chlorure en fonction de l'eau absorbée par les granulats

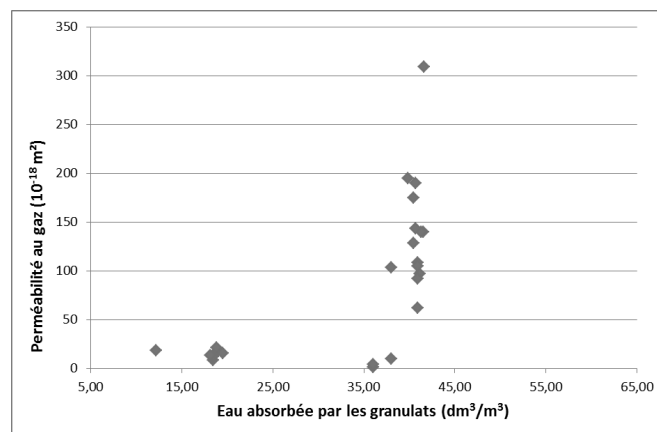


Figure 4 : Evolution de la perméabilité au gaz en fonction de l'eau absorbée par les granulats

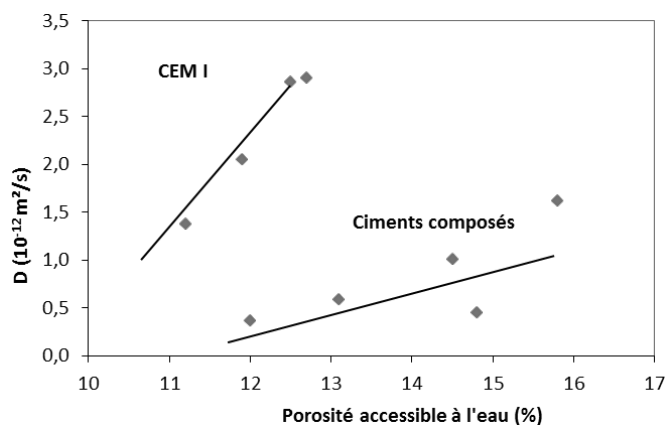


Figure 5 : Evolution du coefficient de diffusion des ions chlorure en fonction de la porosité accessible à l'eau [Chlortest, 2006]

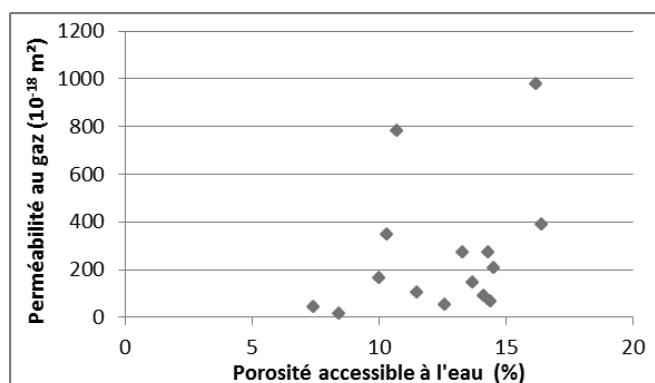


Figure 6 : Evolution de la perméabilité au gaz en fonction de la porosité accessible à l'eau [BHP2000, 2003]

## 4.2. Perméabilité au gaz

Comme pour la diffusion, il n'est pas toujours évident de corréler la perméabilité à l'air des bétons à leur porosité accessible à l'eau. De nombreux résultats issus de la littérature [Abbas, 1998, BHP2000, 2003] ont montré que la perméabilité dépend plus de la part de porosité connectée et communicante que de l'ensemble de la porosité accessible à l'eau d'un béton (figure 6).

## 5. IMPACT DE LA SATURATION EN EAU DES GRANULATS SUR L'ENSEMBLE DES PERFORMANCES DES BÉTONS

Il a été constaté pendant la phase d'essais de convenances sur les trois centrales à béton installées par le Groupement de Constructeurs du viaduc que le maintien de rhéologie du béton obtenu en phase d'études en laboratoire n'était pas satisfaisant.

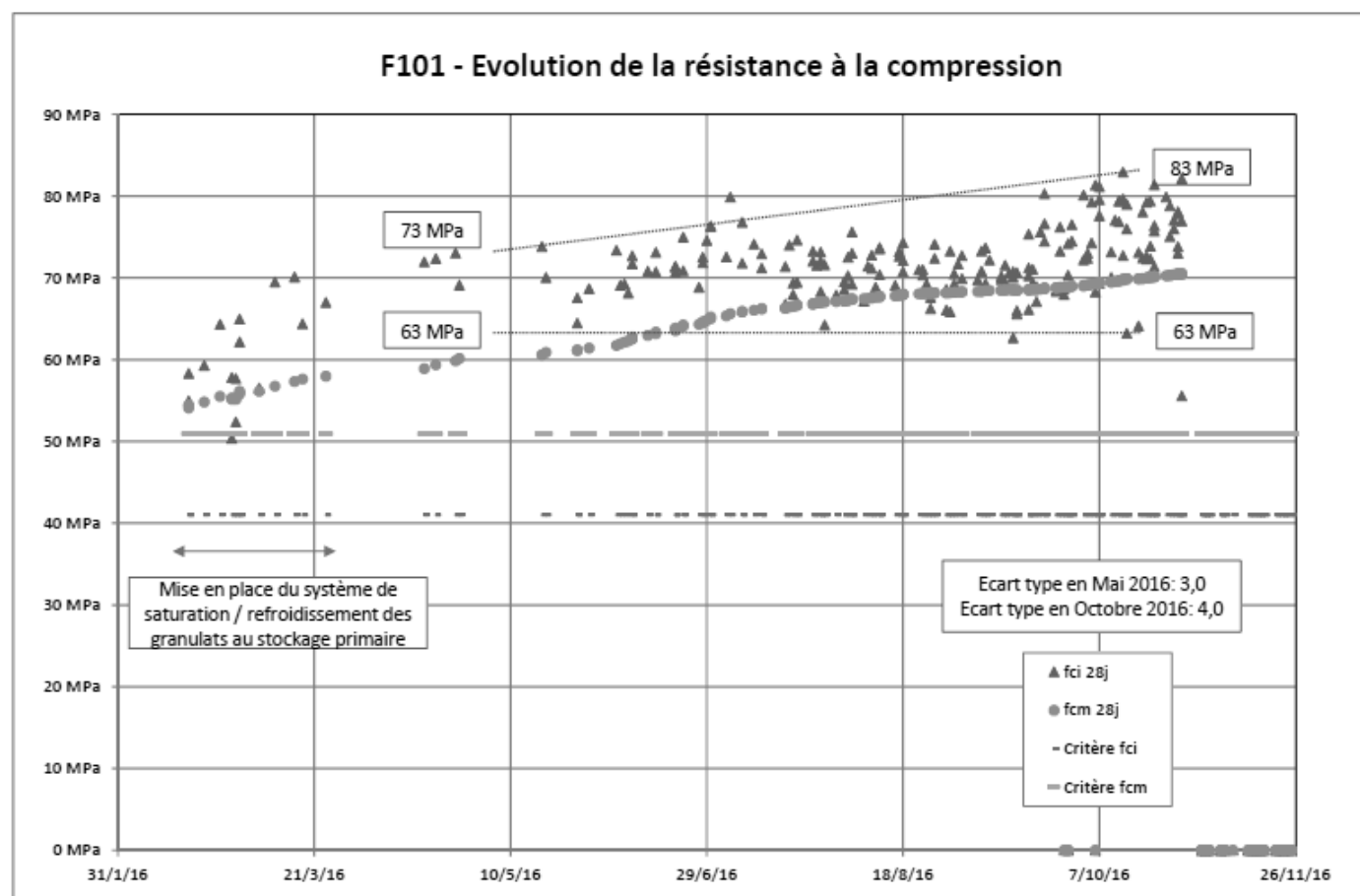


Figure 7 : Evolution de la résistance mécanique à la compression des bétons réalisés pour la NRL

Des investigations réalisées tant en laboratoire qu'en centrale à béton, incluant parmi d'autres paramètres le facteur saturation/inhibition des granulats, ont mis en évidence qu'une phase d'inhibition conduisant à une complète saturation des granulats était (comme illustré sur la figure 7) un facteur prépondérant tant sur le maintien d'ouvrabilité du béton frais que sur les performances mécaniques à la compression du béton durci mais influençait moins les tendances mesurées sur les indicateurs de durabilité.

## 6. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

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. Lorsqu'une analyse plus approfondie des risques de corrosion est nécessaire, c'est le cas pour la Nouvelle Route du Littoral sur l'île de la Réunion, il est plus rigoureux de considérer le coefficient de diffusion des chlorures. Le recours à cet indicateur de durabilité est particulièrement pertinent d'une part parce qu'il intègre de manière plus globale l'ensemble des caractéristiques du béton, dont sa porosité, et d'autre part parce que les modèles de durabilité les plus complets en vue d'une utilisation opérationnelle sur un projet fonctionnent avec ce paramètre. Certains modèles de durabilité utilisent comme paramètre d'entrée à la fois le coefficient de diffusion des ions chlorure et la porosité. Dans ces modèles, il est possible d'utiliser ces indicateurs globaux en ayant recours à des facteurs correctifs qui prennent en compte la contribution de la porosité apportée par la matrice cimentaire et celle apportée par les granulats. Parmi ces modèles, SDReaM-CRETE, le modèle développé par le CERIB, a déjà été utilisé en ce sens afin d'estimer les performances de bétons réalisés avec des granulats recyclés au regard des risques de carbonatation. Ces modélisations ont été réalisées dans le cadre du projet national Recybéton.

Dans le cas du projet NRL, une étude de sensibilité comparative a été réalisée en considérant deux modèles de durabilité : le modèle code de la *fib* et SDReaM-CRETE, Cette étude de sensibilité a permis de dégager des pistes d'optimisation du couple « béton/enrobage » au regard des durées de vie visées et des conditions environnementales.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] [Perfdub, 2016] French National Project "Perfdub", Website: <http://www.perfdub.fr/en/>.
- [2] [Modevie, 2016] French Projet "Modevie", Website: [http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anrfunded-project/?tx\\_lwmsuivibilan\\_pi2%5BCODE%5D=ANR-14-CE22-0018](http://www.agence-nationale-recherche.fr/en/anrfunded-project/?tx_lwmsuivibilan_pi2%5BCODE%5D=ANR-14-CE22-0018).
- [3] [AFGC, 2007] CONCRETE DESIGN FOR A GIVEN STRUCTURE SERVICE LIFE - Durability management with regard to reinforcement corrosion and alkali-silica reaction - State of the art and Guide for the implementation of a predictive performance approach based upon durability indicators, AFGC, 20007.
- [4] [Mai-Nhu *et al.*, 2015] Mai-Nhu J, Rougeau P, Linger L, Denis, Magné, The New Coastal Road on Reunion Island (France): Application of durability model to a real case, fib Copenhagen 2015.
- [5] [Linger *et al.*, 2017], Linger L, Rougeau P, Mai-Nhu J, Torrenti J,M, Outteryck, Denis, Magné, Dupuy Implementation of a global durability approach in close cooperation between Owner/Engineer, Durability Consultants, Designers and Contractor's Joint-venture for the New Coastal Road on Reunion Island (France), fib Maastricht 2017.
- [6] [de Larrard, 1999] de Larrard F, Concrete Mixture-Proportioning – A Scientific Approach, Modern Concrete Technology Series, No, 9, E & FN SPON, London, 1999.
- [7] [Washburn, 1921] Washburn EW, The dynamics of capillary flow, Physical Review, 1921, 17, 273–283, 1921.
- [8] [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.
- [9] [Nguyen, 2014] Nguyen VN, Rapport d'activité sur une étude SEAC, Document interne LMDC, 2014.
- [10] [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.
- [11] [Powers, 1958] TC, Powers, Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, Journal of American Ceramic Society 41-1, pp1-6, 1958.
- [12] [Taylor, 2004] Taylor HFW, Cement chemistry, Thomas Telford Edition, 2004, Aberdeen, Scotland.
- [13] [Waller, 1999] Waller V, Relations entre la composition des bétons, exothermie en cours de prise et résistance en compression, Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1999.
- [14] [Chlortest, 2006] European Project, "Resistance of concrete to chloride ingress – from laboratory tests to in-field performance", 2003-2006.
- [15] [Abbas, 1998] Abbas A, Influence de l'état de saturation du matériau sur la mesure de la perméabilité au gaz et sur la nature des écoulements, doctorat de l'INSA de Toulouse, LMDC, 1998.
- [16] [BHP2000, 2003] Final report National project "BHP2000", 1995-2003.