# Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension des propriétés mécaniques des bétons

Taoufik Achour<sup>1</sup>, Saloua El Euch Khay<sup>2</sup>, Emna Jarraya<sup>2</sup>, Jamel Neji<sup>2</sup>

- 1. Laboratoire de génie civil, École nationale d'ingénieurs de Tunis, université de Tunis El Manar, BP 37, Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie achour\_taoufik@yahoo.fr
- 2. Laboratoire de matériaux d'optimisation et d'énergie pour la durabilité, École nationale d'ingénieurs de Tunis, université de Tunis El Manar, BP 37, Le Belvédère, 1002 Tunis, Tunisie eleuchsaloua@yahoo.fr, e.emna.jarraya@gmail.com, jamel.neji@enit.rnu.tn

RÉSUMÉ. Les travaux présentés dans cet article s'intéressent à la modélisation théorique des propriétés mécaniques des bétons à travers leur caractérisation expérimentale. Il s'agit de vérifier la pertinence des modèles les plus récents de prédiction des résistances à la compression et à la traction des bétons à travers des mélanges hydrauliques réalisés avec des granulats calcaires locaux en valorisant les sables fillérisés dans leur composition. Pour cela, une variété de mélanges hydrauliques optimisés (béton de sable, micro-béton et béton), récemment réalisés en 2016 à l'École nationale d'ingénieurs de Tunis, avec des granulats de même provenance a été testée expérimentalement à différentes échéances selon les propriétés recherchées. Les résultats des essais réalisés se trouvent dans la plage de performances des bétons ordinaires. Pour la résistance à la compression, les modèles testés de De Larrard, Tango et ACI 318 sont avérés tous pertinents, à des degrés différents, dans la plage de performance étudiée, bien que les deux derniers ne prennent pas en compte d'une manière significative l'effet du granulat dans la prédiction de la résistance à la compression. Quant à la résistance à la traction, les modèles BAEL et Eurocode sous-estiment la plupart des performances mesurées, en l'occurrence pour les modèles d'ACI et d'Oluokun, ils les surestiment. Ainsi, l'écart moyen entre prévision et expérimental reste assez grand pour l'ensemble de ces modèles. En effet, le fait de ne pas prendre en compte la topologie et la nature du granulat a erroné les prédictions de ces modèles. Pour les modèles de De Larrard et de Achour et al., ils estiment bien les résultats expérimentaux. L'erreur reste toujours faible, ce qui traduit le bien-fondé de ces deux modèles en introduisant, surtout pour le modèle de Achour, de façon explicite la cohésion dans la zone de transition pâte-granulat et la résistance limite du granulat en traction.

ABSTRACT. The work presented in this paper is interested in the theoretical modelling of the mechanical properties of concretes through their experimental characterization. It is to validate the relevance of the latest prediction models of the compressive and tensile strengths of concrete when applied to concrete mixtures made with local limestone aggregates and using filler sand. For that purpose, a variety of optimized concrete mixtures (sand concrete, micro-concrete, and

concrete), recently made in 2016 at National Engineering School of Tunis, with aggregates from the same source, was tested experimentally at different curing ages. The results of the experimental tests are within the performance range of ordinary concrete. For the compressive strength, the tested models Béton-LabPro3, Tango, and ACI318 proved all to be relevant at different degrees, but within the range of the studied performance. However, the Tango and ACI models do not take into account in a significant manner the effect of aggregates on the compressive strength of concrete. With regard to the tensile strength, the BAEL and Eurocode models were found to underestimate this property, while the ACI and Oluokun models were found to overestimate it. In fact, the average difference between models' predicted values and those measured was found to be high. This high difference is mainly due to the fact that these models do not take into account the topology and the nature of the aggregates. On the other hand, the Béton-LabPro3 and Achour et al. models well-estimated the tested mixtures tensile strength as the difference between the predicted and experimental values was low. This finding reflects the merits of these two models, especially the one by Achour et al., which explicitly consider the cohesion in the transition zone between the cement paste and aggregates as well as the aggregates traction resistance limit.

MOTS CLÉS : béton, modélisation mécanique, granulat, fillers, résistance à la compression, résistance à la traction.

KEYWORDS: concrete, theoretical modeling, aggregate, fillers, compressive strength, tensile strength.

DOI: 10.3166/rcma.2017.00008 © 2017 Lavoisier

## **Extended abstract**

In this paper, the mechanical behavior of concrete is studied through the analysis of its compressive and tensile strength. For that purpose, laboratory tests were performed on a set of concrete mixtures in order to compare the experimental results with those predicted by various existing models. For the compressive strength, the studied models are those of De Larrard, Tango, and ACI 318. While for the tensile strength, the evaluated models are those of BAEL, Oluokun, Eurocode 2, De Larrard, and the hyperbolic law relationship developed by Achour et al. It is to note that only these last two models take into consideration the characteristics of the aggregates into their prediction equations. The paper begins by a brief presentation of the different studied models and cites the works where the basis (theory, domain of application, used mixes, etc.) of their prediction equations are developed. Then, a description of the experimental program performed during this study is presented. The used aggregates are of calcareous nature. They were all provided from the same site, same quarry, and went through the same production cycle. For the needs of this study, three different aggregate class gradations were used: A sand class high in filler content, a medium and large size classes of coarse aggregates. Results of the identification tests performed on these aggregates showed that they were suitable for concrete production to be used in pavement constructions. Portland cement manufactured by a local plant and classified as CEM I 42,5N according to Tunisian standards was used for producing all the concrete mixtures used in this research effort. Some of the properties of this cement were found by performing laboratory tests while others were provided from the supplier. The concrete mixtures used in this study were designed according to De Larrard compressible packing model through the use of the software Béton-LabPro3. Three types of mixtures were formulated: a sand concrete, a micro-concrete, and a conventional concrete. All types of concrete mixes were designed with a constant cement content that is typical for rigid pavement jobs. In the last part of the paper, results of the prediction models as used for the concrete mixes designed in this study are presented. In terms of compressive strength, the three used prediction models gave similar results to what was measured for the different studied mixes. However, in general, a slightly higher error was found for De Larrard model as compared to Tango and ACI 318 models. This finding tends to mean that differences in the geometrical and physical properties of the used aggregates did not have significant and quantifiable effects on the theoretical compressive strength predictions of the studied models. On the other hand, the tensile strength results showed that each used model presented a certain degree of relevance. In fact, the error extent between experimental and predicted values were quite high for the BAEL, Oluokun, Eurocode 2, and ACI 318-99 models, with some error values exceeding 20%. In contrast to these models, the De Larrad and the hyperbolic law function models, i.e. those which take into account in their theoretical basis the mechanical properties and petrography of the aggregates, had better predictions as compared to measured data. Their errors were relatively small, with relatively better results found with the hyperbolic law function model. This latter model takes into account in a more explicit way the properties of the aggregates and the quality of adhesion between the cement paste and aggregates.

#### 1. Introduction

Le béton est un matériau composite formé de mélanges de propriétés différentes. La caractérisation rigoureuse de ses paramètres à travers une modélisation théorique est parfois une opération assez compliquée. Dans la littérature, plusieurs modèles ont été proposés pour prédire ses propriétés sous la base souvent de la caractérisation expérimentale de ses constituants et de leurs dosages dans le mélange. Toutefois chacun de ces modèles a été calibré sur un ensemble bien défini de mélanges, ce qui laisse à penser qu'il peut dériver et perdre ses pertinences sur d'autres mélanges. Dans cet article, on s'intéresse à examiner la pertinence de certains de ces modèles à travers des mélanges réalisés avec des granulats calcaires concassés en valorisant les sables fillérisés dans leur composition. Les modèles sélectionnés sont ceux associés aux prédictions de la résistance à la compression et à la traction.

L'article commence par exposer sommairement les différents modèles à expertiser. Une identification des matériaux utilisés et les formules retenues sont aussi données. L'article présente ensuite les résultats des essais mécaniques recherchés des différents mélanges réalisés à différentes échéances. Les essais ont été effectués récemment en 2016 à l'École nationale d'ingénieurs de Tunis. Une estimation des propriétés

mécaniques selon les modèles sélectionnés est déterminée. Elles sont comparées à celles déterminées expérimentalement, ce qui permet d'en déduire la pertinence des modèles étudiés.

#### 2. Présentation des modèles

Plusieurs chercheurs se sont intéressés à la modélisation des propriétés mécaniques des bétons en particulier la résistance à la compression et la résistance à la traction. Dans le présent article, les modèles de compression testés sont ceux donnés par De Larrad, Tango et American Concrete Institute (ACI) 318. Ceux de traction sélectionnés sont De Larrard, Achour *et al.*, BAEL, Eurocode 2, ACI 318-99 et Oluokum. Les fondements de calcul de chaque modèle sont bien présentés dans la littérature. Ici on présente leurs équations associées ainsi que les espaces dont lesquels les modèles ont été validés.

## 2.1. Modèles de résistance à la compression

### 2.1.1. Modèle de De Larrard (1999)

De Larrard (1999) a postulé que si un mélange de béton est soumis à des forces de compression alors la pâte située entre les gros granulats est soumise à la contrainte maximale. Il présentera un modèle plus complet dont lequel le béton est assimilé à un matériau composite formé d'une phase rigide dure et inerte (le granulat) suspendue dans une matrice liante (la pâte de ciment), l'ensemble étant considéré comme homogène. La résistance prévisionnelle à la compression du béton fc(t) à différentes échéances (de 1 jour à 1 an) est calculée par étapes. Les détails de calcul et les fondements des relations sont présentés dans son ouvrage (De Larrard, 1999). Le calcul de la résistance prévisionnelle à la compression des bétons fc(t) est déterminé à partir de la résistance de la matrice liante  $fc_{\rm m}(t)$  dans le temps et des deux coefficients p et q caractérisant respectivement l'effet d'adhérence pâte-granulats et l'effet limitant du granulat. Selon ce modèle les valeurs habituelles de p s'inscrivent dans l'intervalle [0,5;1,2], celles de q entre [0;0,006] MPa $^{-1}$ .

$$fc(t) = \frac{pfc_{\rm m}(t)}{qfc_{\rm m}(t) + 1},\tag{1}$$

où  $fc_{\rm m}$  est donnée par l'équation suivante :

$$fc_m(t) = 13,4 R_{C_{28}} \left[ d(t) - 0,0023 \frac{d(7)}{t} \frac{\mathring{a} S_{FI_{ij}} f_{ij}}{c} + \left( 1 + \rho_c \frac{e+a}{c_{cq}} \right)^{-2,85} \right] EMP^{-0,13}, \quad (2)$$

avec  $R_{c28}$ : résistance du ciment à 28 jours ; t: âge en jours ; d(t): terme cinétique du ciment exprimant le développement de la résistance à la compression à un âge t,  $S_{FI}$ : surface spécifique Blaine des fillers calcaires ;  $f_i$ : masse de fillers calcaires par unité de volume de béton ; e: volume d'eau dans une unité de volume de béton ; e: volume

d'air occlus dans une unité de volume de pâte de ciment frais ;  $\rho_c$  : densité du ciment sans fillers ; c : masse de ciment sans fillers par unité de volume de béton et  $c_{eq}$  : masse équivalente de ciment.

Contrairement aux modèles anciens tels que celui présenté par Féret (1892), le modèle de De Larrard (1999) a l'avantage de faire intervenir particulièrement la nature du granulat (sa résistance mécanique) *via* le coefficient q et sa composition minéralogique *via* le coefficient p. Il est bien connu que la résistance du béton est contrôlée par la résistance du granulat. Elle est plus faible pour les granulats les plus tendres.

Ce modèle tient compte aussi de la présence des fillers calcaires, ajoutés au ciment Portland ou apportés par les granulats, dans le béton. L'ajout de fillers influe, d'une part, sur la résistance de la matrice liante  $fc_{\rm m}(t)$  dans le temps et, d'autre part, sur la quantité du ciment équivalent dans la formule du béton.

Il est à noter enfin que ce modèle a montré parfaitement sa pertinence pour des performances de bétons et de granulats très contrastées. Sa précision est en deçà de 2 à 3 MPa. Précisons toutefois qu'il a été calibré sur des bétons ayant généralement une structure granulaire optimisée non trop fillérisée.

#### 2.1.2. Autres modèles

Deux autres modèles ont été sélectionnés. Le premier est celui de Tango (2000). Ce dernier a essayé de simplifier le modèle de Powers et Brownyard (1946) en substituant le degré d'hydratation. Une fonction du temps, fc(t), a été proposée pour tenir compte de l'hydratation initiale comme donnée dans l'équation suivante :

$$fc(t) = \frac{A}{B(\frac{E}{C})F_1(\frac{E}{C})t^{-0.5}F_2t^{-0.5}}.$$
 (3)

Bien que le modèle soit plus simple à appliquer, les propriétés du ciment et des granulats n'ont pas été tenues en compte et des paramètres de calibration  $(A, B, F_1, F_2)$  ont été ajoutés, ce qui a limité son application.

Le second modèle testé est celui proposé par American Concrete Institute (ACI) 318 (2005). Il est applicable que pour les bétons formulés avec du ciment de type I et ayant été protégés contre le dessèchement. Ce modèle est donné par l'équation (4) où  $fc_{28}$  est la résistance à la compression du mélange à 28 jours en MPa et t est l'échéance en jours. Notons toutefois que la relation proposée ne prend pas non seulement en compte d'une manière précise et explicite l'effet réel du granulat (ni sa nature minéralogique, ni sa résistance mécanique) mais aussi le rôle des additions minérales « liantes » utilisées dans les bétons à hautes performances, ni celui des fillers calcaires pouvant avoir aussi certains effets (accélérateur de montée en résistance, par exemple).

$$fc(t) = fc_{28} \left( \frac{t}{4 + 0.85t} \right). \tag{4}$$

# 2.2. Modèles de résistance à la traction

### 2.2.1. Modèle de De Larrard (1999)

Comme la plupart des lois avancés, le modèle proposé par de De Larrard (1999) est de type loi de puissance entre la résistance à la traction par fendage ft et la résistance à la compression fc. Il est défini par l'équation suivante :

$$ft = k_t f c^{0.57}, \tag{5}$$

avec  $k_t$  est le coefficient qui dépend de la nature du granulat (De Larrard, 1999).

Ce modèle a l'avantage de faire intervenir la nature du granulat (via le coefficient  $k_t$ ), qui peut changer considérablement d'une roche à une autre. Il est connu que la résistance à la traction du composite diminue lorsque le granulat n'est pas propre (présence d'argiles par exemple). Toutefois, il ne prend pas en compte d'une manière satisfaisante les propriétés mécaniques de la liaison pâte-granulat et du granulat ainsi que les propriétés physiques de la matrice cimentaire. Notons aussi que si le paramètre  $k_t$  est déterminé avec soin et si les mesures des essais sont effectuées avec précision, l'incertitude du modèle est de 0.17 MPa.

# 2.2.2. Modèle hyperbolique de Achour et al. (2008)

Constatant que l'évolution de la résistance à la traction en fonction de celle à la compression ne coïncide pas nettement avec une loi puissance, Achour *et al.* (2008) proposent un modèle innovant de type hyperbolique qui apporte un sens physique au comportement à la traction des mélanges hydrauliques étudiés. Ce modèle est décrit par l'équation suivante :

$$ft = p'fc/(q'fc+1), (6)$$

avec p' est le coefficient dépendant des propriétés mécaniques de la liaison pâtegranulat et q' est le coefficient dépendant des propriétés mécaniques du granulat.

En pratique, il suffit d'avoir deux bétons de performances contrastées en compression et en traction  $(fc_1, ft_1)$  et  $(fc_2, ft_2)$  pour déterminer les valeurs de p' et q'.

Il est à signaler que ce modèle convient mieux pour une large gamme de performance contrastée de traction et de compression des bétons. Il a l'avantage aussi de faire intervenir la cohésion dans la zone de transition pâte-granulat et la résistance limite du granulat en traction.

Notons enfin que les paramètres du modèle proposé ont pu être reliés à la résistance intrinsèque de la roche mère dont issu le granulat, ce qui constitue un avantage bien considérable.

# 2.2.3. Autres modèles

D'autres modèles ont été aussi sélectionnés. Leurs équations correspondantes sont regroupées dans le tableau 1. Elles sont de deux formes, soit linéaire soit en puissance.

Modèles	Équations	Remarques	
Modèle linéaire			
BAEL	ft = 0.6 + 0.06  fc  (7)	$fc \leq 60 \text{ MPa}$	
Modèles puissance			
Eurocode 2	$ft = \frac{0.3fc^{0.5}}{0.9} $ (8)	$fc \leq 50 \text{ MPa}$	
ACI 318-99	$ft = 0.56  fc^{0.5}  (9)$	$14 \le fc \le 41 \text{ MPa}$	
Oluokun	$ft = 0.214  fc^{0.69}  (10)$	$14 \le fc \le 63 \text{ MPa}$ Béton de densité normale	

Tableau 1. Modèles de prédiction de la résistance à la traction du béton

Pour la première forme, le modèle sélectionné est celui proposé par le BAEL (1999). La relation donnée s'applique pour les bétons dont la résistance à la compression est inférieure à 60 MPa. Pour la forme de puissance, les modèles étudiés sont ceux de Eurocode 2 (2005), ACI 318-99 (1999) et Oluokun (1991). Chacun de ces derniers s'applique pour une plage de performance bien déterminée. Ils sont définis par les équations présentées dans le tableau 1. Notons enfin que le modèle de Oluokun est restreint aux bétons de densité normale.

## 3. Campagne expérimentale

## 3.1. Caractérisation des matériaux

Les matériaux granulaires utilisés sont issus de la même roche calcaire et proviennent de la même carrière. Les prélèvements des granulats nécessaires à la fabrication des mélanges hydrauliques ont été effectués en une seule fois. Leurs modes de production dans les carrières est basé sur l'emploi de deux concasseurs à percussion. Le premier sert à fournir le sable SC de classe granulaire 0/4, l'autre permet de produire deux classes de gravillons G (un gravillon intermédiaire G1 de classe granulaire 5/12,5 et un plus gros gravillon G2 de classe granulaire 4/16).

Le ciment portland sélectionné C est le CEM I 42,5N. Il est fourni par une cimenterie locale. Sa masse volumique est 3 117 kg/m³ et sa surface Blaine est de 340 m²/kg. Une analyse granulométrique a été effectuée pour l'ensemble de ces matériaux, et ce selon les normes en vigueur. Leurs courbes granulométriques sont données sur la figure 1.

La campagne expérimentale effectuée a permis de déterminer certaines propriétés physiques et mécaniques des matériaux étudiés à savoir la masse volumique absolue

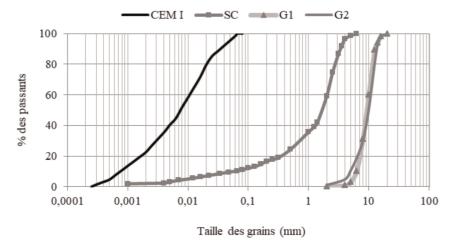


Figure 1. Courbes granulométriques des matériaux d'étude

Tableau 2. Propriétés des matériaux d'é	tude
---	------

Propriétés	SC 0/4	G1 5/12,5	G2 4/16	Ciment C	Fillers
MVA (kg/m <sup>3</sup> )	2 690	2 700	2 700		
Coefficient d'absorption (%)	0,78	0,62	0,62		
Teneur en fillers (%)	11	1,50	0,85		
IP	Ind	Ind	Ind		
ES 0/2 (%)	88	-	-		
LA (%)		23			
Compacité	0,717	0,602	0,629	0,553	0,559

Ind: indéterminable.

MVA, le coefficient d'absorption, la teneur en fillers, l'indice de plasticité (IP), l'équivalent de sable (ES) sur la fraction 0/2, le coefficient Los Angeles (LA) et la mesure de la compacité. Elles sont regroupées dans le tableau 2. Ce dernier est complété par la mesure de la compacité de ciment et des fillers.

La lecture des propriétés mesurées des matériaux sélectionnés n'interdit pas leur usage dans les bétons de chaussées et particulièrement dans les couches de roulement et ce selon la norme NF EN 12620 (2011).

# 3.2. Formulations des mélanges

Les formules retenues ont été faites en se basant sur le modèle d'empilement compressible MEC, et ce en utilisant le logiciel Béton-LabPro3. Ce dernier a été développé par De Larrard (1999), qui avait proposé initialement un premier modèle linéaire de compacité (De Larrard, 1988), puis un modèle de suspension solide (De Larrard et al., 1994), moins pertinent que le MEC. Ces formules ont servi à produire un béton de sable (BS) (C, SC), un micro-béton (MB) (C, SC, G1,) et un béton (B) (C, SC, G2). Notons que l'optimisation du squelette granulaire (SC, G1, G2) a montré que G1 est décompactant pour le mélange. Le taux de SC est de l'ordre de 40 %, celui de G2 est de 60 % dont 20 % est de classe granulaire 12,5/16 (G'2). Le reste, soit 80 % de G2, peut être assimilé comme une première approximation à G1 puisqu'il est de même classe granulaire, d'autant plus qu'il s'agit de la même provenance du site, et donc de la même roche, et élaboré dans les mêmes conditions. Le dosage en ciment est choisi constant et égal à 330 kg/m<sup>3</sup>, ce qui correspond à un dosage courant dans les bétons de chaussées. La consistance des trois bétons est également choisie constante et égale à 6 cm au cône d'Abrams (NF EN 12350-2, 2012), ce qui correspond à des bétons plastiques ordinaires. Les formules ainsi sélectionnées correspondent à des mélanges de performances courantes (plusieurs observations faites sur des mélanges déjà réalisés dans divers projets sont de performances similaires).

Les quantités, par unité de volume de béton, de chaque matériau et pour chaque mélange étudié sont obtenues après simulation des gâchées et vérification de l'affaissement. Les valeurs de ces quantités sont reportées dans le tableau 3.

Des essais mécaniques de compression et de fendage sur ces mélanges ont été effectués sur des éprouvettes cylindriques de dimension  $10 \times 20\,\mathrm{cm}$  conservées dans l'eau à  $20\,^\circ\mathrm{C}$  et mesurées aux échéances (1, 3, 7, 14 et 28 jours). Trois éprouvettes ont servi pour mesurer la résistance à la compression aux échéances données et trois autres pour mesurer la résistance à la traction aux mêmes échéances. Le nombre total d'éprouvettes ainsi réalisés s'élève à 90 unités. Les valeurs retenues correspondent en général à la moyenne algébrique des résultats, dans l'hypothèse de valeurs centrées. Les résultats obtenus sont ceux des bétons de performances ordinaires, des fc inférieures à 40 MPa et des ft inférieures à 4 MPa. Selon la norme NF P 98-170 (2011), le classement de ces bétons justifient bien leurs exploitations en couche de roulement de chaussée à l'exception de BS qu'il est recommandé de l'utiliser dans un trafic faible.

#### 4. Modélisations

Dans cette partie de modélisation, les différents mélanges étudiés, bétons de sable, micro-bétons et bétons, à travers leurs résultats expérimentaux à la compression et à la traction, ont servi à calibrer les paramètres de chaque modèle étudié. Le meilleur lissage entre prévisions du modèle et valeurs expérimentales est

	BS	MB	В
Ciment (kg/m³)	330	330	330
SC (kg/m <sup>3</sup> )	1 662	844	736
G1 (kg/m <sup>3</sup> )	0	988	896
G'2 (kg/m <sup>3</sup> )	0	0	224
E (eau efficace) (kg/m <sup>3</sup> )	203	193	189
E/C	0,62	0,58	0,57

Tableau 3. Quantités de matériaux par unité de volume de béton

retenu. La pertinence de chaque modèle est donnée. Des interprétations et des conclusions ont été tirées.

## 4.1. Résistance à la compression

Les résultats de calcul de la résistance théorique fcth du composite selon les différents modèles étudiés ainsi que les valeurs expérimentales retenues  $fc_{exp}$  sont reportés sur la figure 2. La marge d'erreur pour chacun de ces modèles est aussi présentée.

La lecture de la figure dénote une bonne prévisibilité de la résistance théorique pour l'ensemble des modèles étudiés dans la plage de performances étudiées avec toutefois un taux d'erreur plus élevé pour le modèle de De Larrard (1999) par rapport aux autres modèles Tango (2000) et ACI (2005), ce qui laisse à penser que les contrastes des propriétés des matériaux d'étude pour les mélanges testés n'ont pas d'effet significative et quantifiable sur les prédictions des modèles étudiés. Notons toutefois que, pour l'ensemble des modèles, l'erreur est calculée selon l'équation suivante :

$$Erreur = \frac{1}{n} \times \sum \frac{|P_i - O_i|}{O_i} \times 100, \tag{11}$$

avec  $O_i$ : valeur expérimentale,  $P_i$ : valeur prédite et n: nombre de valeurs prédites.

## 4.2. Résistance à la traction

Comme pour la résistance à la compression, les résultats de calcul de la résistance à la traction théorique  $ft_{th}$  et les ajustements effectués pour chaque modèle sont donnés sur

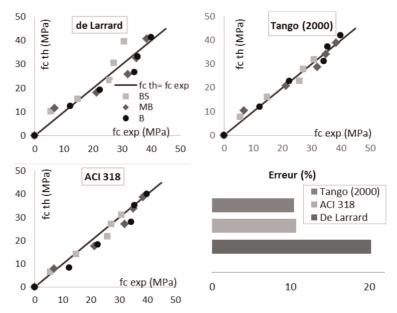


Figure 2. Résistance à la compression des mélanges selon les modèles étudiés – Pertinence

la figure 3. Les résistances expérimentales  $ft_{exp}$  sont aussi présentées. Les figures des modèles BAEL, Oluokun, Eurocode 2 et ACI 318-99, ne tenant pas en compte des contrastes des propriétés entre les granulats, sont regroupées dans la section (a) alors que celles De Larrard et de Achour *et al.*, que leurs modèles tiennent compte de ces contrastes, sont données dans la section (b). La marge d'erreur pour chacun des modèles étudiés est présentée sur la figure 4.

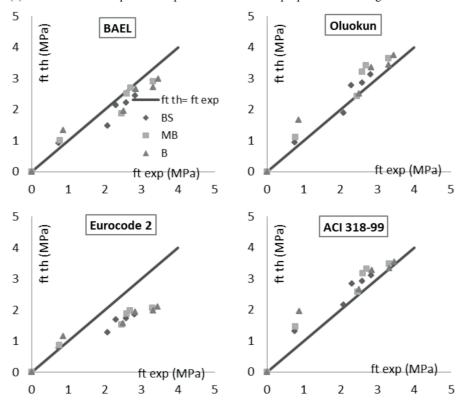
La lecture des figures 3 et 4 fait appelle aux remarques suivantes :

- les marges d'erreurs sont élevées pour les modèles qui ne tiennent pas en compte les contrastes des propriétés entre les granulats dans leurs prédictions;
- les modèles tenant compte des propriétés mécaniques et pétrographiques des granulats et de la nature de la liaison pâte-granulat (modèle de De Larrard (1999) et loi hyperbolique (2008)) procurent les meilleures estimations. Leurs erreurs sont relativement faibles. Toutefois, le modèle hyperbolique a l'avantage d'associer de manière plus explicite les propriétés du granulat et de la zone de transition pâte de ciment-granulat.

# 5. Conclusion

Les différents mélanges étudiés, bétons de sable, micro-bétons et bétons, ont été formulés avec des granulats concassés et un sable fillérisé de même nature calcaire et

(a). Modèles ne tenant pas en compte des contrastes des propriétés entre les granulats



(b). Modèles tenant en compte des contrastes des propriétés entre les granulats

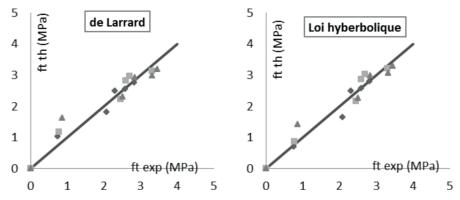


Figure 3. Résistance à la traction des mélanges selon les modèles étudiés

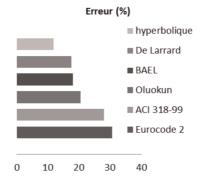


Figure 4. Marge d'erreur pour chaque modèle de traction étudié

optimisés à l'aide du logiciel Béton-LabPro3. Leurs résistances à la compression et à la traction répondent bien aux exigences d'utilisation comme couches de roulement pour les chaussées rigides. Une modélisation empirique des caractéristiques mécaniques de ces mélanges a montré la pertinence de chaque modèle. Pour la résistance à la compression, les modèles testés sont avérés tous pertinents, à des degrés différents, dans la plage de performance étudiée. Quant à la résistance à la traction, le modèle de Achour  $et\ al$ . et sa loi hyperbolique procure la meilleure estimation. Son erreur est relativement faible. Ce modèle est le seul à prendre en considération les propriétés mécaniques de la liaison pâte-granulat et du granulat lui-même par l'intermédiaire des coefficients p' et q'.

Notons enfin que ces travaux ont permis de valoriser mieux les ressources granulaires de nature calcaire dans les bétons de chaussées.

# **Bibliographie**

- Achour T., Lecomte A., Ben Ouezdou M., Mensi R. (2008). Tensile strength and elastic modulus of calcareous concrete: application to Tunisians' mixtures. *Materials and Structures*, vol. 41, nº 8, p. 1427-1439.
- ACI 318-99/318R-99. (1999). Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich, 369 p.
- ACI 318-05. (2005). Building code requirements for structural concrete and commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- De Larrard F. (1988). Formulation et propriétés des bétons à très hautes performances, Laboratoire des Ponts et Chaussées, 149, 342 p.
- De Larrard F., Sedran T., Angot D. (1994). Prévision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide. I: fondements théoriques et étalonnage du modèle, *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, vol. 194, p. 77-86.
- De Larrard F. (1999). Concrete mixture proportioning: a scientific approach, in : Mindess S. Bentur A. eds. *Modern concrete technology*, 9, E & FN SPON, London.

- Eurocode 2. (2005). Calcul des structures en béton Partie 1-1, règles générales et règles pour les bâtiments, Eurocode 2, France.
- Féret R. (1892). Sur la compacité des mortiers hydrauliques. *Annales des Ponts et Chaussées*, vol. 7, n° 4, p. 5-164.
- NF EN 12620. (2011). Granulats pour béton, AFNOR normalisation, norme française.
- NF EN 12350-2. (2012). Essais pour béton frais Partie 2 : essai d'affaissement, *AFNOR normalisation*, norme française.
- NF P 98-170. (2011). Chaussées en béton de ciment Exécution et contrôle, *AFNOR normalisation*, norme française.
- NF BAEL 91 révisées 99. (1999). Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites, *Fascicule 62*, titre 1<sup>er</sup> du CCTG Travaux section 1 : béton armé 1.
- Oluokun F.A. (1991). Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: evaluation of existing relations for normal weight concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 88, n° 3.
- Powers T.C., Brownyard T.L. (1946). Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste, American Concrete Institute.