

---

# Caractérisation et modélisation du béton à base de déchets de briques concassés

**Wafa Ben Achour, Saloua El Euch Khay, Jamel Neji**

*Laboratoire de matériaux, d'optimisation et d'énergie pour la durabilité (LRMOED), université Tunis El Manar, École nationale d'ingénieurs de Tunis, BP 37, Le Belvédère, 1002, Tunis, Tunisie*  
w\_benachour@yahoo.fr, eleuchsaloua@yahoo.fr, nejij@yahoo.fr

---

**RÉSUMÉ.** *Le but de ce travail est la caractérisation du béton hydraulique routier à base de déchets de briques produits par les briqueteries. Le présent travail s'intéresse d'abord à une étude expérimentale où différentes formules à base de déchets de briques ont été mises au point en utilisant la méthode du LCPC. Ensuite, les performances mécaniques de ces mélanges ont été déterminées moyennant des essais standard au laboratoire. Enfin, la prédiction des caractéristiques mécaniques du béton de brique étudié a été conduite en se basant sur plusieurs modèles de la littérature afin de juger la pertinence de ces modèles dans le cas du béton de déchets de briques. Dans cette investigation, une baisse des caractéristiques mécaniques du béton avec l'augmentation du pourcentage de substitution en déchets de briques a été observée. Néanmoins, cette baisse reste modérée jusqu'à un pourcentage de 30 %. Enfin, les modèles de prédiction de Larrard et al. relatifs aux différentes caractéristiques mécaniques se sont avérés pertinents et s'appliquent bien au cas de béton de déchets de briques.*

**ABSTRACT.** *The aim of this work is the characterization of road Portland cement concrete formulated with brick waste provided by brickyards. The present work focuses first on an experimental study in which different mixes made with brick waste have been developed using recent LCPC method. Then, the mechanical performances of these mixes were determined through several laboratory tests. Finally, a modelling of the mechanical characteristics was carried out using several models of the literature in order to evaluate the relevance of these models for the case of brick waste concrete. During this investigation, a decrease in mechanical characteristics was observed with the increase of the percentage of substitution of brick waste, but this decrease remains moderated up to a percentage of 30%. Finally, the models of de Larrard et al., which are used to predict the different mechanical characteristics of normal aggregates concrete, are proved to be all relevant for also brick waste concrete.*

**MOTS-CLÉS :** *béton hydraulique, déchets de briques concassés, performances mécaniques, modélisation.*

**KEYWORDS:** *concrete, crushed brick waste, mechanical properties, modelling.*

---

DOI: 10.3166/rcma.2017.00009 © 2017 Lavoisier

## **Extended abstract**

Nowadays, concrete has witnessed a lot of progress and several ranges of concrete have emerged due to the use of additives, fibers, mineral additions, as well as the recycling of inert waste. In fact, the recycling of waste in concrete has a positive impact on both the environment by solving the problem of storage of this waste, and the economy by using it in the field of construction or industry.

In Tunisia, the brick factory sector provides annually large quantities of brick waste. Indeed, in 2015, brick production was estimated at 15 million tons, generating a waste of about 5%. Hence the idea of using the brick waste, as a substitution to natural aggregates, in the production of road Portland cement concrete which contains, in addition to water and cement, finely and coarse crushed waste bricks to replace respectively natural sand and gravel. Such a substitution may be total or partial.

The aim of this work is the characterization of road Portland cement concrete formulated with brick waste provided by brickyards, whose current use is often limited to the embankment and the consolidation of the traffic lanes borne by these factories' transport equipments.

The present work focuses first on an experimental study in which different mixes made with brick waste have been developed using the LCPC method. Then, the mechanical performances of these mixes were determined through several laboratory tests. Finally, a modelling of the mechanical characteristics was carried out using several models of the literature in order to evaluate the relevance of these models for the case of brick concrete.

The results of compressive, tensile and modulus of elasticity tests showed that these characteristics decrease with the increase of the percentage of substitution of brick waste. For a substitution of 10% of natural aggregates by bricks, the decrease is not significant. It remains moderate up to a percentage of 30% and it is much more pronounced in the case of a total substitution.

Concerning the modelling of the mechanical properties of brick concrete, the models of compressive strength and tensile strength proposed by de Larrard (2000) are proved to be all relevant. The Eurocode 2 model for tensile strength also presented good results with a slight overestimation of the low strengths. However, the models of BAEL and Oluokun are less precise. The mechanical behaviour of the brick waste concrete studied by these two models is therefore not adequately described.

## **1. Introduction**

En Tunisie, le secteur des briques en terre cuite libère annuellement des quantités importantes de déchets de briques. La production en 2015 a été estimée à 15 millions de tonnes engendrant une quantité de déchets estimée à environ 5 %.

La Tunisie est un pays en cours de développement où le secteur du bâtiment et des travaux publics ne cesse d'évoluer et les besoins en granulats, par conséquent, ne

cessent d'augmenter. Pour cette raison, et afin de limiter l'emprunt des granulats neufs (très nocif pour l'environnement), il devient nécessaire de chercher d'autres ressources en granulats. L'idée est l'utilisation des déchets de briques, en substitution des granulats neufs, dans la fabrication de béton hydraulique routier.

Le béton de brique est ainsi un béton qui contient, en plus de l'eau et du ciment, des déchets de briques concassés finement pour remplacer le sable et d'autres concassés grossièrement pour remplacer le gravier. La substitution peut être totale ou partielle.

Plusieurs investigations récentes à travers le monde avaient pour but la valorisation des déchets de briques dans le béton hydraulique où les chercheurs se sont intéressés à étudier l'influence de l'introduction des déchets de briques concassés sur les performances des bétons. La plupart des études ont été menées en utilisant les déchets de briques concassés (finement et grossièrement), pour remplacer le sable naturel, le gravier naturel, ou les deux simultanément en faisant varier les pourcentages de substitution du déchet dans le béton (Debieb et Kenai, 2008 ; Cachim, 2009 ; Aliabdo *et al.*, 2014 ; Rekha et Potharaju, 2015). Il a été constaté que les différentes caractéristiques diminuent avec le pourcentage de substitution en déchets de briques. Néanmoins, ces recherches ont abouti à des résultats encourageants permettant l'utilisation de ce béton (Debieb et Kenai, 2008 ; Cachim, 2009 ; Aliabdo *et al.*, 2014 ; Rekha et Potharaju, 2015).

Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale récente menée dans le but de déterminer les différentes caractéristiques mécaniques du béton de déchets de briques. Différentes formules à base de déchets de briques ont été mises au point en utilisant la méthode du LCPC, afin de voir l'influence du pourcentage de déchets sur les propriétés du béton.

Une modélisation des différentes caractéristiques est également présentée en se basant sur plusieurs modèles de la littérature afin de juger leur pertinence pour le cas de béton de brique.

## 2. Étude de formulation

### 2.1. Identification des matériaux

Le béton de brique est un béton hydraulique composé de granulats neufs (gravier et sables), de déchets de briques concassés, de ciment et d'eau. Lors de cette investigation, un ciment Portland de classe CEM I 42.5, répandant à la norme tunisienne NT47.01 (1996) et ayant une densité spécifique de 3,1 a été utilisé.

Les granulats neufs utilisés sont : un gravier 4/16 (noté Gn) et un sable de concassage 0/4 (noté Sn) provenant d'une carrière du nord du pays.

Les déchets de briques, provenant d'une briqueterie du centre du pays, ont été criblés après leur concassage pour obtenir des classes granulaires similaires à celles des granulats neufs, à savoir un sable de brique 0/4 (noté Sb) et un gravier de brique 4/16 (noté Gb). Un échantillon de chaque classe granulaire de briques est montré sur la figure 1. La distribution granulométrique des différents granulats utilisés dans cette



Figure 1. Échantillons de sable et de gravier de brique

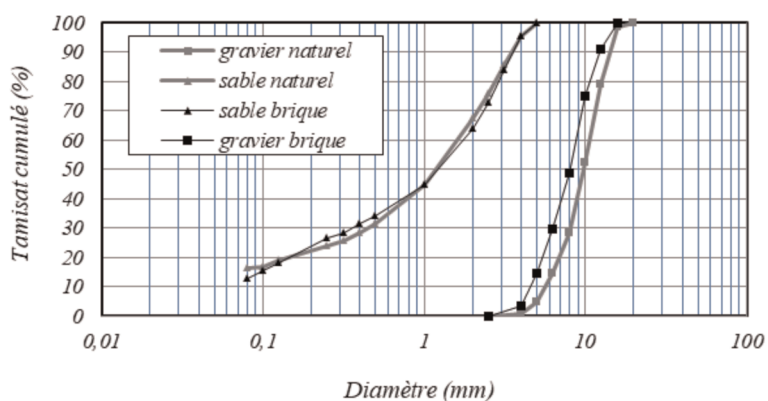


Figure 2. Courbes granulométriques des granulats utilisés

étude est présentée sur la figure 2. Le sable Sb et le sable Sn présentent des matrices granulaires étalées et similaires allant de 0 à 4 mm, et les deux graviers Gn et Gb présentent des courbes granulométriques presque superposées.

Les propriétés physiques et les caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés ont été déterminées selon les normes en vigueur, et les résultats ont été récapitulés dans le tableau 1. Le sable de brique et le sable naturel sont propres et présentent des modules de finesses respectifs de 2,9 et 2,95, des valeurs acceptables pour les bétons de catégorie A et B (AFNOR, 1997). Les résistances à la fragmentation et à l'usure du gravier naturel sont plus élevées que celles du gravier de brique. Les briques concassés présentent un coefficient d'absorption d'eau nettement supérieur à celui des granulats naturels en raison de leur porosité plus élevée.



Tableau 1. Caractéristiques des granulats utilisés

Granulats	Gn	Gb	Sn	Sb
<i>Poids spécifique (<math>t/m^3</math>)</i>				
NF P 18-554	2,7	2,3		
NF P 18-555			2,7	2,3
<i>Équivalent de sable ES (NF P 18-598)</i>	-	-	75,5	78,9
<i>Module de finesse MF (NF P 18-560)</i>	-	-	2,95	2,9
<i>Propreté superficielle des graviers (%) (NF P 18-591)</i>	1,3	0,7	-	-
<i>Coefficient d'absorption (%)</i>				
NF P 18-554	0,56	12,4		
NF P 18-555			0,56	12,4
<i>Los Angeles</i>				
NF P 18-573	22,8	38		
<i>Fines &lt; 80 <math>\mu m</math> (%)</i>	1	0,5	16,11	12,9

## 2.2. Étude de formulation

L'étude de formulation a été menée en utilisant les modèles du Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC), regroupés dans le logiciel BétonlabPro qui est destiné notamment à la formulation et à l'optimisation de la composition des bétons hydrauliques à base de granulats naturels (Sedran et de Larrard, 2000).

La méthode est basée sur une analyse granulaire du matériau permettant de calculer la compacité optimale d'un mélange granulaire quelconque. Les propriétés spécifiques indispensables sont les compacités des fractions granulaire grossière, des fines (< 80  $\mu m$ ), et du ciment, qui ont été déterminés selon des procédures expérimentales conventionnelles, en associant à chaque matériaux un indice de serrage approprié qui est pris égal à 6,7 pour la pâte lisse et à 9 pour les fractions granulaires de diamètres supérieurs 80  $\mu m$  (de Larrard, 2000).

Le dosage en ciment (C) a été fixé à 330  $kg/m^3$ , dosage fréquemment utilisé dans le domaine routier. Le dosage en eau de gâchage (E) a été déterminé pour obtenir un affaissement de 6 cm permettant d'avoir un béton plastique. Ainsi, une formule témoin optimisée de béton ordinaire (sans déchets de briques) désignée par BO a été mise au point.

Tableau 2. Composition des formules testées (1 m<sup>3</sup>)

Formules	E (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	Sn (kg/m <sup>3</sup> )	Gn (kg/m <sup>3</sup> )	Sb (kg/m <sup>3</sup> )	Gb (kg/m <sup>3</sup> )
B0	190	330	930	913,5	0	0
B10	190	330	837	822,1	79,2	77,8
B20	190	330	744	734,7	158,5	155,6
B30	190	330	651	639,5	237,7	233,4
B60	190	330	372	365,4	475,3	467
B100	190	330	0	0	792,2	778,2

Cinq formules de béton, à différents pourcentages volumiques de substitution des granulats naturels par les granulats en déchets de briques, sont ainsi formulées et ensuite réalisées. Elles sont désignées par B10, B20, B30, B60 et B100 contenant respectivement un taux volumique de substitution en déchets de briques de 10, 20, 30, 60 et 100 %. La composition des différentes formules est donnée dans le tableau 2.

L'absorption d'eau des déchets de briques a été prise en compte en imbibant, d'une part, le gravier de brique (Gb) pendant 24 h dans l'eau et en ajoutant, d'autre part, la quantité d'eau qui sera absorbée par le sable de brique (Sb) lors du gâchage.

### 3. Caractéristiques mécaniques des bétons de déchets de briques

Les six formules de béton mises au point ont été soumises à différents essais afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de chaque béton :

- des essais de compression simple, de traction par fendage et de module d'Young ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques 10 × 20 cm (figure 3a-c) au laboratoire de génie civil de l'ENIT.

Les différents essais ont été réalisés à 1, 3, 7, 14 et 28 jours d'âge du béton. Pour chaque formule, 3 éprouvettes ont été testées à chaque âge.

#### 3.1. Résistance à la compression

Des essais de compression simple ont été réalisés (conformément à la norme NF EN 12390-3) sur les bétons de briques étudiés à plusieurs échéances afin de suivre l'évolution de leurs résistances à la compression au cours du temps. Les résultats trouvés sont illustrés sur la figure 4. Pour un pourcentage de substitution de 10 %, la baisse de la

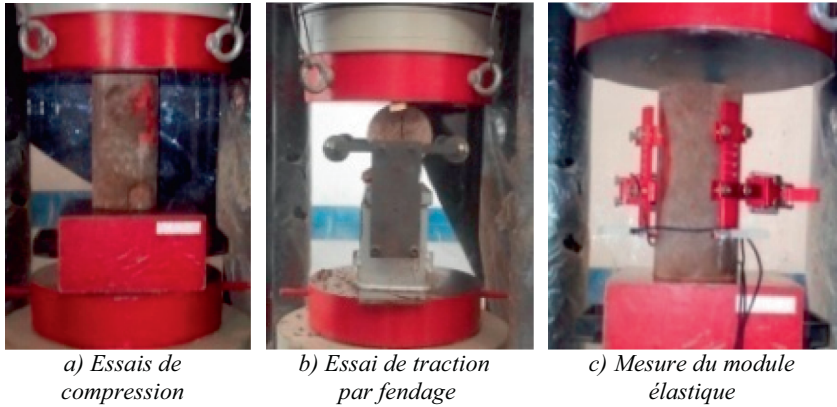


Figure 3. Essais mécaniques standard sur les bétons de déchets de briques

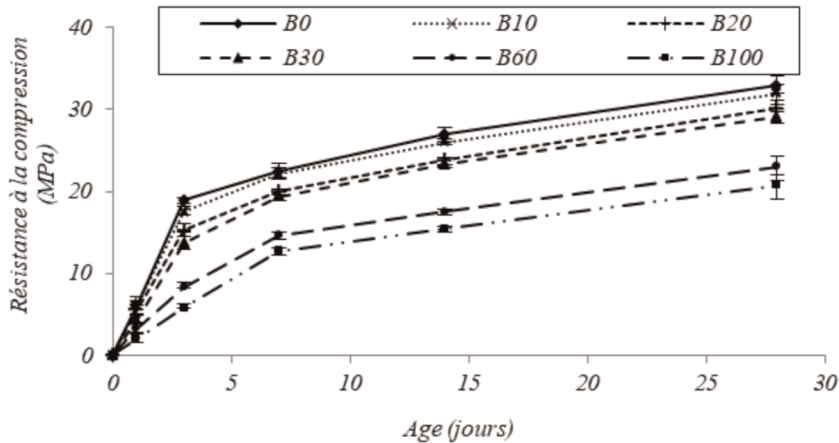


Figure 4. Évolution de la résistance à la compression du béton de brique en fonction de son âge

résistance à 28 jours est non significative. Pour la formule contenant 30 % de déchets de briques, la baisse de la résistance reste faible de l'ordre de 9 % à 28 jours. Par contre, la résistance marque une réduction de 37 % pour une substitution totale. Toutefois, la résistance à la compression minimale obtenue dans le cas d'une substitution totale des granulats naturels par les déchets de briques reste supérieure à 20 MPa qui correspond à la valeur minimale de résistance exigée dans le domaine routier (conformément à la norme NFP 98-170, 1992).

### 3.2. Résistance à la traction par fendage

Les résultats trouvés sont illustrés sur la figure 5. La résistance à la traction par fendage augmente avec l'âge du béton et baisse avec le pourcentage de déchets de

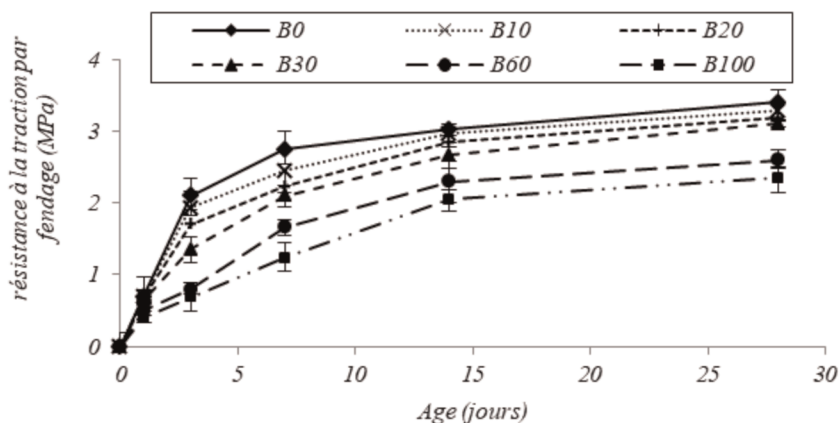


Figure 5. Résistances à la traction par fendage du béton de brique en fonction de son âge

briques. À 28 jours, cette baisse est de l'ordre de 30 % pour le béton à 100 % de granulats en déchets de briques. Néanmoins, la valeur de la résistance à la traction reste supérieure à 2 MPa à 28 jours. Pour un pourcentage de substitution de 30 %, la valeur de la résistance à la traction à 28 jours est supérieure à 3 MPa, une valeur supérieure à l'exigence normative.

### 3.3. Module d'élasticité

Le module d'élasticité a été déterminé (conformément à la norme NF EN 12390-13) pour les différentes formules en appliquant trois cycles de charge-décharge dans le domaine du comportement élastique du béton. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 6. Le module d'élasticité du béton diminue avec l'augmentation du pourcentage de substitution des granulats naturels par les granulats de déchets de briques concassés. À 28 jours, le B100 enregistre la plus grande baisse d'environ 37 % par rapport au béton témoin BO. Ce résultat est prévisible puisque la brique est moins rigide que les granulats naturels de sable et gravier.

### 3.4. Conclusion sur les essais mécaniques

Les résultats des essais de compression simple, de traction par fendage, et de module d'élasticité ont montré tous que les caractéristiques mécaniques du béton de brique diminuent avec l'augmentation du taux de substitution en déchets de briques. Cette diminution est non significative pour un taux de substitution de 10 %, reste modérée jusqu'à un pourcentage de 30 % et devient beaucoup plus prononcée dans le cas d'une substitution totale. Ces résultats rejoignent les résultats publiés par plusieurs chercheurs. En effet, Debieb et Kenai (2008) ont affirmé que la baisse des différentes caractéristiques reste faible jusqu'à un pourcentage de substitution de 25 %. Également,

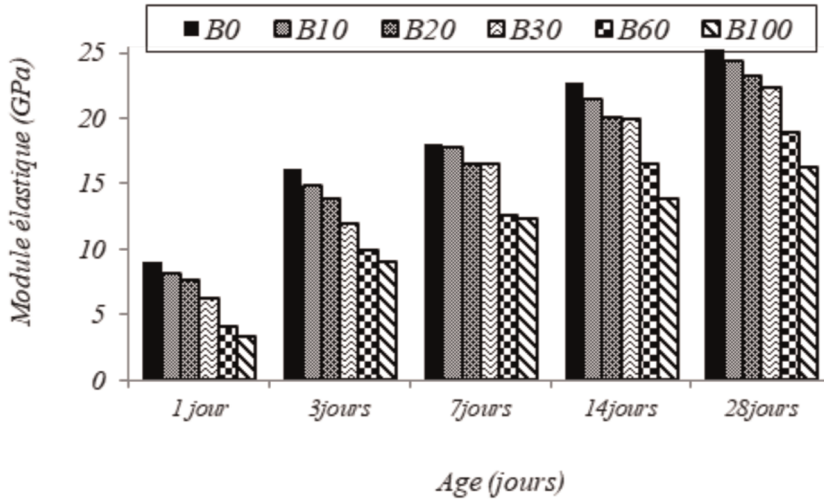


Figure 6. Les mesures du module d'élasticité

les investigations entreprises par Cachim (2009) ont montré qu'il est possible de substituer jusqu'à 15 % de granulats naturels par les déchets de briques sans variation significative de la résistance à la compression. Cette diminution est due essentiellement à la porosité des déchets des briques.

#### 4. Modélisation

Une modélisation des caractéristiques mécaniques a été réalisée en se basant sur plusieurs modèles de la littérature afin d'évaluer la pertinence de ces modèles dans le cas du béton de brique.

##### 4.1. Résistance à la compression

Les résistances prévisionnelles  $f_c(t)$  à différentes échéances ont été calculées par le modèle de de Larrard (2000), qui considère le béton comme composé d'une phase rigide (le granulat) suspendue dans une matrice liante (pâte de ciment).  $f_c(t)$  est donnée par la formule suivante :

$$f_c(t) = \frac{pf_{cm}(t)}{1 + qf_{cm}(t)}, \quad (1)$$

où  $p$  et  $q$  sont des coefficients liés aux caractéristiques des granulats et sont déterminés à partir du lissage des performances mesurées sur chaque mélange dans le temps en minimisant les écarts absolus entre valeurs expérimentales et théoriques par l'utilisation d'un outil d'optimisation numérique.  $f_{cm}(t)$  étant la résistance de la matrice

liante dans le temps. Elle est donnée par la formule (2) :

$$f_{cm}(t) = 13,4\sigma_{c28} \left[ d(t) - 0,0023 \frac{d(7)}{t} \frac{\sum s_{Fi} f_i}{c} + \left[ 1 + \rho_c \frac{E_{eff} + a}{c_{eq}} \right]^{-2,85} \right] EMP^{-0,13}, \quad (2)$$

$\sigma_{c28}$  et  $\rho_c$  étant la classe vraie du ciment à 28 jours et la masse volumique réelle du ciment.  $d(t)$  et  $d(7)$  représentent des paramètres cinétiques, variant au cours du temps en fonction de la résistance du ciment.  $E_{eff}$  et  $a$  représentent respectivement la quantité d'eau efficace et le volume d'air.  $s_{Fi}$  et  $f_i$  représentent les surfaces Blaine et les masses des fillers par unité de volume.  $c_{eq}$  est la quantité équivalente du ciment.  $EMP$  étant l'épaisseur maximale de pâte qui sépare deux granulats de taille  $D_{max}$  (16 mm dans notre cas).  $g$  est le volume granulaire ( $> 80 \mu\text{m}$ ) et  $g^*$  est la compacité maximale du squelette granulaire calculée par le modèle d'empilement compressible.

La confrontation entre les valeurs expérimentales de la résistance à la compression du béton de brique et les prédictions, du modèle de de Larrard est représentée sur la figure 7 (en fonction de la résistance à la compression de la pâte cimentaire) et sur la figure 8. L'écart moyen (égal à la moyenne arithmétique des écarts individuels absolus) entre expérience et lissage varie de 1,84 MPa pour B0 à 2,5 MPa pour B100, ce qui permet de conclure que le modèle de de Larrard est pertinent aussi dans le cas de béton de brique.

#### 4.2. Résistance à la traction

Les résistances à la traction théoriques,  $f_t$ , ont été déterminées par les quatre modèles suivants issus de la littérature :

- le modèle BAEL (1999) :

$$f_t = 0,6 + 0,006f_c ; \quad (3)$$

- le modèle de l'Eurocode 2 (2005) :

$$f_t = \frac{0,3f_c^{2/3}}{0,9} ; \quad (4)$$

- le modèle d'Oluokun (1991) :

$$f_t = 0,214f_c^{0,69} ; \quad (5)$$

- le modèle de de Larrard (2000) :

$$f_t = k_t f_c^{0,57}, \quad (6)$$

où  $f_c$  est la résistance à la compression du béton et  $k_t$  est un coefficient variable dépendant de la nature du granulat.

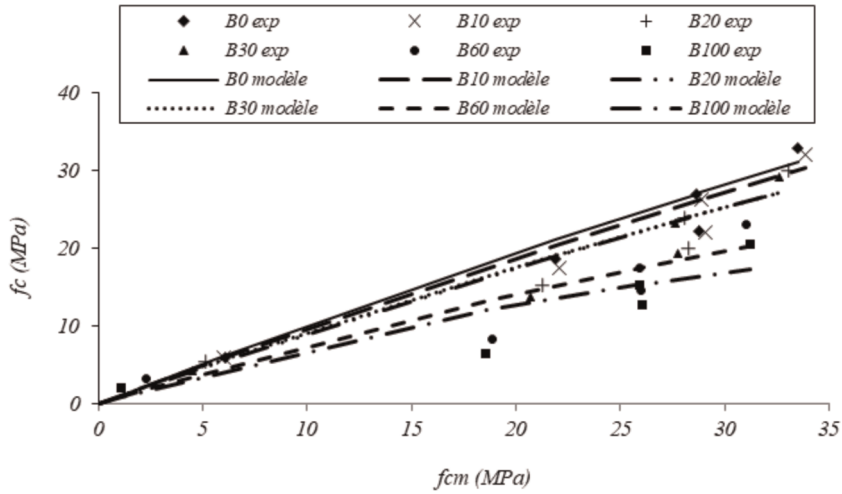


Figure 7. Variation de  $f_c$  en fonction de  $f_{cm}$

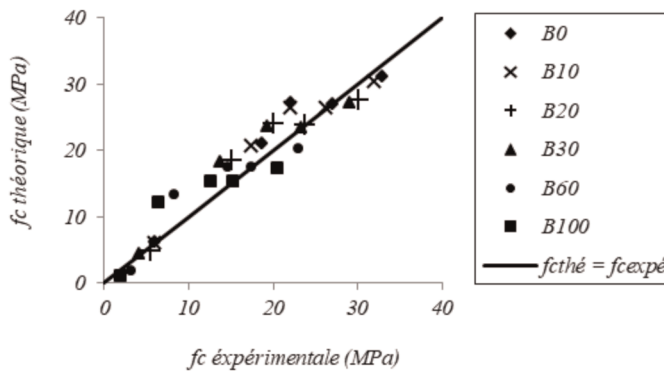


Figure 8. Résistance à la compression théorique en fonction de la résistance expérimentale

Les valeurs expérimentales ainsi que les prédictions des modèles présentés ci-dessus sont illustrées sur la figure 9.

Les modèles de traction conventionnels de type lois en puissance proposés par de Larrard (2000) et l'Eurocode 2 (2005) ont présenté des écarts variant de 0,16 MPa pour B0 à 0,3 MPa pour le B100. Pour ces modèles, les faibles résistances à la traction sont légèrement surestimées. Ces résultats sont acceptables par comparaison avec les modèles proposés par le BAEL (1999) et Oluokun (1991) qui montrent des écarts plus importants allant jusqu'à 0,7 MPa et sous-estiment en plus les fortes résistances à la traction (figure 10).



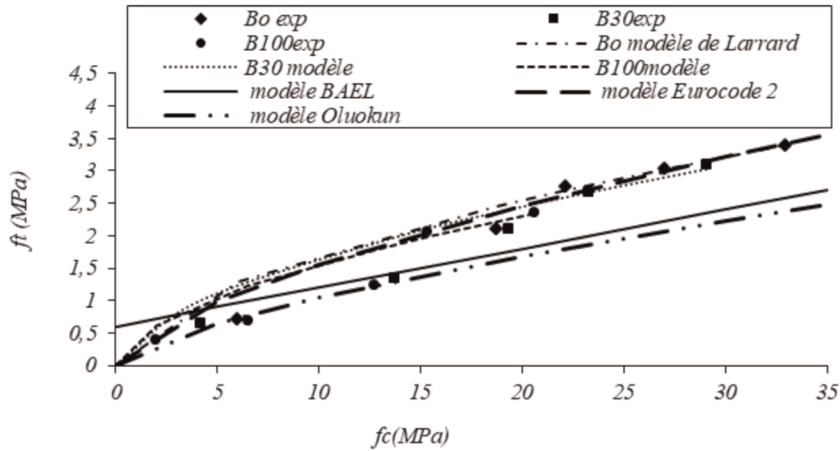


Figure 9. Variation de la résistance à la traction en fonction de la résistance à la compression

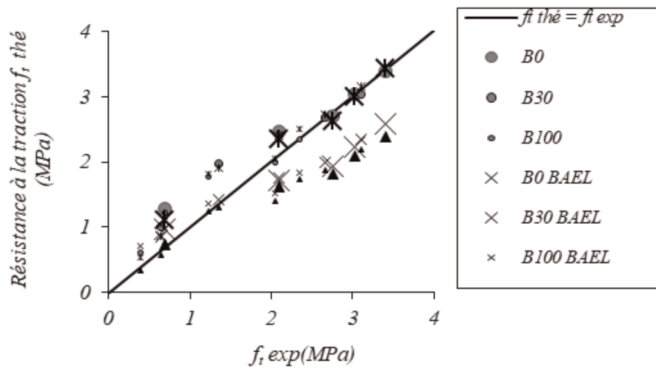


Figure 10. Résistance à la traction théorique en fonction de la résistance expérimentale

## 5. Conclusion

Cette investigation a permis de caractériser un béton hydraulique à base de déchets de briques à différents taux de substitution. Six formules ont été mises au point en utilisant le modèle d'empilement compressible du LCPC. Les performances mécaniques de ces formules ont été ensuite déterminées moyennant des essais de laboratoire standard.

Il a été constaté que pour un pourcentage de substitution allant jusqu'à 30 %, la baisse de la résistance à la compression et à la traction par fendage demeure modérée. Au-delà de 30 %, la diminution des différentes résistances mécaniques est plus marquée. Toutefois,

les valeurs trouvées restent supérieures aux valeurs exigées par la norme en vigueur relative aux applications routières. Le module d'élasticité a également enregistré une baisse atteignant 37 % pour un pourcentage de substitution de 100 %.

Tous ces résultats expérimentaux rejoignent ceux publiés récemment par plusieurs équipes de recherches (Debieb et Kenai, 2008 ; Cachim, 2009 ; Aliabdo *et al.*, 2014 ; Rekha et Potharaju, 2015).

En ce qui concerne la modélisation des propriétés mécaniques du béton de brique, les modèles de la résistance à la compression, de la résistance à la traction proposés par de Larrard se sont avérés pertinents. Le modèle de l'Eurocode 2 pour la résistance à la traction a également donné de bons résultats avec une surestimation légère des faibles résistances. Par contre, les modèles du BAEL et d'Oluokun sont moins précis en présentant des écarts importants entre prédictions et résultats expérimentaux. Le comportement mécanique des bétons étudiés à base de déchets de briques n'est donc pas décrit de manière pertinente par ces deux modèles.

Les résultats trouvés peuvent encourager à utiliser le béton de brique dans le corps de chaussée. Néanmoins, les investigations doivent être approfondies afin d'étudier d'autres aspects et d'autres caractéristiques du béton qui peuvent éventuellement varier en présence de déchets de briques.

## Bibliographie

- Aliabdo A., Abd-Elmoaty M., Hassan H. (2014). Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alex. Eng. J.*, vol. 53, p. 151-168.
- Cachim P.B. (2009). Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, p. 1292-1297.
- Debieb F., Kenai S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Constr. Build. Mater.*, vol. 22, p. 886-893.
- de Larrard F. (2000). *Structures granulaires et formulation des bétons*, LCPC, série OA34.
- Rekha K., Potharaju M. (2015). Residual compressive strength of recycled brick aggregate concrete at high temperatures. *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 5, n° 1.
- Norme française BAEL 91 modifié 99 (1999). *Règles de conception et de calcul des ouvrages en béton armé*.
- Norme française NF EN 1992-1. (2005). *Eurocode 2, Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments. Calcul des structures en béton*, Édition AFNOR, Paris.
- Norme française NFP98-170. (1992). *Chaussées en béton de ciment, exécution et contrôle*.
- Norme tunisienne NT47-01. (1996). *Ciment : composition, spécification et critères de conformité*, INORPI.
- Norme française XP P 18-540. (1997). *Granulats, définitions, conformité et spécifications*, Édition AFNOR, Paris.

Oluokun F.A. (1991). Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: evaluation of existing relations for normal weight concrete. *ACI Mater. J.*, vol. 88, n° 3, p. 302-309.

Sedran T., de Larrard F. (2000). *BétonlabPro2-Logiciel de formulation de bétons-version exécutable sous Windows, logiciel sur CD ROM avec aide en ligne*, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.