

Substitution Totale du Sable Naturel par du Sable Concassé dans le Béton : Une Solution Pertinente pour le Liban

Faten ABI FARRAJ^{1,2}

¹ Université de Toulouse ; UPS, INSA ; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), Toulouse, France

² Ecole Doctorale des Sciences et Technologies, Université Libanaise, Beyrouth, Liban

RESUME En raison de la détérioration de la qualité du sable naturel siliceux et des effets néfastes de son exploitation pour l'environnement, le secteur de la construction au Liban, comme dans plusieurs autres pays, doit trouver une solution de substitution à son usage. Actuellement, ce sable trop fin pour être utilisé comme seul sable dans le béton selon la norme ASTM C33, est toujours mélangé avec un pourcentage approprié d'un sable calcaire concassé de carrière. L'objectif de cette étude est d'évaluer la possibilité de remplacement total de ce sable naturel par du sable concassé calcaire, afin de limiter la dépendance actuelle du secteur de la construction libanaise à son utilisation, dans la perspective d'une éventuelle future interdiction de son exploitation pour des raisons environnementales ou du fait de sa raréfaction. Le programme expérimental consiste à comparer les caractéristiques mécaniques, résistances à la compression et à la flexion, évaluées à différentes échéances, de différentes formulations de béton avec ou sans sable naturel. L'analyse comparative des résultats permet d'évaluer les effets du type de sable et des distributions granulométriques. Les résultats obtenus permettent de conclure que le sable concassé calcaire peut être considéré comme une solution alternative pertinente à l'utilisation du sable naturel siliceux.

Mots-clefs Sable naturel siliceux, Sable concassé calcaire, Résistance à la compression, Résistance à la flexion

I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction de nombreux pays souffre actuellement de la perte de qualité du sable naturel. De plus, sa surexploitation a des effets néfastes sur l'environnement et entraîne l'épuisement de cette ressource. Le Liban est particulièrement impacté par cette situation, avec notamment l'entrée en vigueur de législations strictes imposées par le gouvernement sur l'extraction du sable naturel siliceux, affectant ainsi le prix du béton.

Pour limiter ces inconvénients, des solutions consistant à remplacer, totalement ou partiellement, le sable naturel par du sable concassé, dans les bétons et mortiers, ont déjà été envisagées. Ces études ont montré que la substitution totale du sable naturel par du sable concassé, de surface plus rugueuse et de formes de grains plus anguleuses que celles du sable naturel à grains plus sphériques, permet de conférer de meilleures performances mécaniques au béton (Donza et al. 2002, Stefanidou 2016, Yamei et al. 2017). Ces performances améliorées sont attribuées à une meilleure adhérence entre les grains du sable concassé et la pâte de ciment.

Au Liban, le sable naturel utilisé dans le béton de construction provient de la fragmentation du grès. Il est de nature essentiellement siliceuse et est constitué de petits grains de quartz arrondis recouverts par des traces de calcite, d'hématite ou d'argile (Hamad et al. 1996). Ce sable, très fin, présente une granulométrie ne respectant pas le fuseau imposé par la norme ASTM C33 (ASTM C33, 2016) en vigueur au Liban. Pour compenser cette finesse excessive, il est toujours combiné à une proportion adaptée de sable plus grossier, de nature calcaire concassé, provenant de carrières localisées dans les montagnes libanaises.

L'objectif de cet article est d'évaluer la possibilité de substitution totale du sable siliceux naturel par le sable calcaire concassé, tout en maintenant les performances mécaniques du béton. Dans cette optique, un programme d'essais de caractérisation mécanique a été mené sur deux classes de béton, avec, pour chaque classe, trois formulations comparables : une de référence incorporant le mélange conforme à la norme ASTM C33, composé de sable naturel siliceux et de sable calcaire concassé, et deux formulations sans sable naturel et avec le seul sable calcaire concassé mais avec une variation de sa courbe granulométrique. Les résistances à la compression et à la flexion sont comparées à différentes échéances, pour analyser l'influence de la nature du sable et de sa granulométrie sur les propriétés mécaniques du béton.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

A. Caractérisation des matériaux

Le tableau 1 présente les caractéristiques chimiques des deux sables et des deux gravillons utilisés. Le sable naturel est de nature siliceuse (87.25% de SiO₂), avec des grains sphériques, alors que le sable concassé est de nature calcaire avec des grains anguleux. Les gravillons concassés utilisés (D_{max} 10 mm et D_{max} 20 mm) proviennent de la même carrière que celle du sable concassé, ce qui explique leurs propriétés chimiques comparables.

TABLEAU 1. Caractéristiques chimiques des matériaux obtenues par la méthode ICP

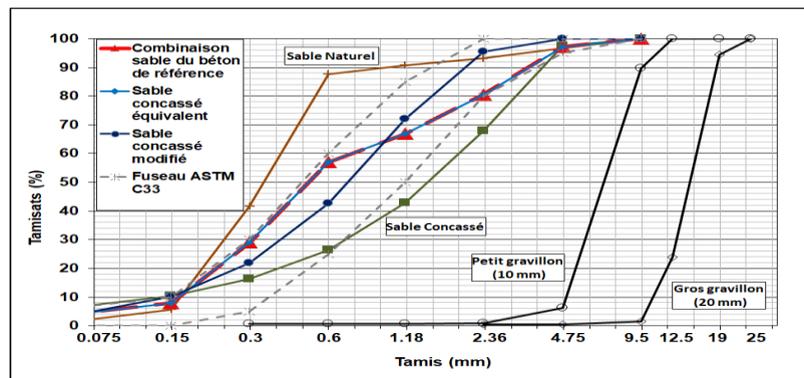
Pourcentage massique (%)	Sable naturel	Sable concassé	Petit gravillon (10 mm)	Gros gravillon (20 mm)
SiO ₂	87.25	1.22	0.90	0.57
CaO	4.95	54.03	53.18	55.22
Autres	3.16	1.55	1.32	1.06
Perte au feu (%)	4.64	43.20	44.60	43.15

Outre leur différence chimique, les deux types de sable diffèrent aussi par leurs propriétés physiques, comme le montre le Tableau 2. Le sable concassé présente des valeurs d'absorption et un pourcentage de fines supérieurs à ceux du sable naturel, alors que celui-ci présente une densité plus élevée.

TABLEAU 2. Caractéristiques physiques des matériaux

Propriétés	Sable naturel	Sable concassé	Petit gravillon (10 mm)	Gros gravillon (20 mm)
Densité spécifique – ASTM C127 & ASTM C128	2.62	2.55	2.66	2.67
Absorption (%) – ASTM C127 & ASTM C128	1.10	2.60	0.60	0.50
Fines < 75 µm (%) – ASTM C117	2.3	7.2	0.6	0.3

La Figure 1 montre les distributions granulométriques des différents types de granulats utilisés dans cette étude. Celles des sables sont comparées avec le fuseau défini par la norme ASTM C33. Le sable naturel se distingue par une distribution granulométrique très fine qui le situe globalement au-dessus de la limite maximale imposée par la norme ASTM C33, alors que le sable concassé classique présente une fraction granulométrique plus grossière qui le situe globalement au-dessous de la limite inférieure. Par conséquent, pour respecter le fuseau de cette norme, les deux types de sable sont toujours mélangés en proportions adéquates dans toutes les formulations de béton vendues sur le marché libanais.

**FIGURE 1.** Distribution granulométrique des granulats

Trois types de sable sont utilisés dans chacune des trois formulations de béton de cette étude et leurs granulométries sont représentées dans la Figure 1 :

- La « Combinaison sable du béton de référence » est la combinaison conventionnelle utilisée dans le secteur de la construction libanais. Il s'agit d'un mélange à masse équivalente des deux types de sable, à savoir 50% sable naturel et 50% sable concassé classique, qui permet d'obtenir une granulométrie de sable qui se situe à l'intérieur du fuseau de la norme ASTM C33. Dans cette étude, cette combinaison est caractérisée par un pourcentage de fines (particules passant le tamis 75 µm) de 4.79%.
- Le « Sable concassé équivalent » correspond au sable calcaire concassé mais dont la granulométrie a été reconstruite au laboratoire pour être strictement identique à celle de la combinaison de sable du béton de référence, afin de pouvoir étudier les seuls effets de la nature et de la morphologie des grains de sable à même granulométrie et même pourcentage de fines.

- Le « *Sable concassé modifié* » est le sable calcaire concassé, spécifiquement produit par la même carrière libanaise fournissant le sable concassé utilisé dans les autres formulations, pour étudier l'effet d'une granulométrie mieux distribuée que les deux premières et qui se situe dans une zone plus médiane du fuseau de la norme ASTM C33. Dans cette étude, ce sable est caractérisé par un pourcentage de fines de 5.05%.

Le ciment utilisé dans toutes les formulations est un ciment Portland ordinaire (sans ajout) ayant une résistance moyenne à la compression de 51.74 MPa à l'échéance de 28 jours.

B. Formulations des bétons

Pour évaluer l'influence de la substitution du sable naturel par du sable concassé sur les propriétés mécaniques du béton, trois types de formulation de béton sont étudiés, qui diffèrent principalement par le type de sable et sa granulométrie :

- Béton de référence « BR » qui correspond au mélange conventionnel utilisé au Liban, composé de la « *Combinaison de sable du béton de référence* » avec des proportions massives égales de sable naturel et de sable concassé.
- Béton équivalent « BE » avec le « *Sable concassé équivalent* » comme unique granulat fin.
- Béton modifié « BM » avec le « *Sable concassé modifié* » comme unique granulat fin.

Pour chaque type de mélange, deux classes de résistance sont étudiées avec les proportions détaillées dans le Tableau 3 :

- Classe 30 MPa : cette classe, couramment utilisée au Liban, est caractérisée par un dosage en ciment de 350 kg/m³ et un rapport Eau Efficace/Ciment de 0.5. Pour les trois types de béton, les proportions de gravillons sont fixées. La « *Combinaison de sable du béton de référence* » dans le « BR » est remplacée par un volume équivalent de sable concassé pour les deux autres types « BE » et « BM ».
- Classe 40 MPa : pour avoir une formulation plus écologique et pour accentuer les effets des granulats, les proportions du ciment et de l'eau sont réduites en comparaison avec la classe 30 MPa (300 kg/m³ de ciment et rapport Eau efficace/Ciment de 0.4). Le remplacement du granulat fin entre les trois types de béton se fait suivant le même principe que pour la classe 30 MPa. Les proportions de gravillons sont aussi fixées entre les trois formulations et sont plus élevées que celles de la classe 30 MPa.

Afin d'obtenir un béton de bonne maniabilité, l'affaissement visé est de 20 cm pour tous les types de béton et pour les deux classes de résistance. Ainsi, pour chaque mélange, le dosage du superplastifiant a été adapté pour atteindre cette valeur. On peut noter que ce dosage diminue avec le remplacement du sable naturel par le sable concassé, ce qui présente un avantage économique pour ce type de béton.

TABLEAU 3. Proportions des matériaux (kg/m³) dans les six formulations de bétons

Type	Ciment	Eau efficace	Adjuvant	Sable naturel	Sable concassé	Sable concassé équivalent	Sable concassé modifié	Petit gravillon (10 mm)	Gros gravillon (20 mm)
BR-30	350	175	2.47	406	406	0	0	427	566
BE-30			1.01	0	0	802	0		
BM-30			0	0	0	0	802		
BR-40	300	120	10.38	448	448	0	0	471	624
BE-40			6.90	0	0	884	0		
BM-40			5.99	0	0	0	884		

C. Résistances mécaniques

Pour chaque classe et pour chaque formulation, les résistances à la compression et à la flexion sont évaluées à différentes échéances. Les éprouvettes d'essai sont préparées par piquage selon la norme ASTM C192 (ASTM C192, 2016), démoulées après 24 heures et conservées dans l'eau à 23 ± 2 °C jusqu'au jour de l'essai.

L'essai de résistance à la compression est réalisé sur trois éprouvettes cylindriques de 15x30 cm à chacune des trois échéances de 3, 7 et 28 jours avec une vitesse de chargement de 0.25 ± 0.05 MPa/s conformément à la norme ASTM C39 (ASTM C39, 2017).

Pour l'essai de la résistance à la flexion, trois prismes de 10x10x50 cm sont sollicités en flexion 4 points à 28 jours avec une vitesse de chargement de 0.0583 ± 0.0083 kN/s conformément à la norme ASTM C78 (ASTM C78, 2016).

III. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le tableau 4 fournit les valeurs moyennes et les écart-types de résistance à la compression pour les différentes échéances et de la résistance à la flexion à 28 jours, calculés à partir des résultats de 3 échantillons pour chaque type de béton et chaque classe.

TABLEAU 4. Résistances à la compression et à la flexion aux différentes échéances (en MPa)

Classe	Type	Résistance à la compression			Résistance à la flexion
		3 jours	7 jours	28 jours	28 jours
30 MPa	BR-30	17.8 (0.52)	24.7 (1.11)	35.1 (0.34)	5.05 (0.17)
	BE-30	17.5 (0.30)	24.6 (0.39)	35.8 (1.05)	5.44 (0.68)
	BM-30	17.5 (0.87)	24.2 (1.74)	33.5 (0.86)	5.59 (0.88)
40 MPa	BR-40	27.4 (0.02)	39.1 (1.41)	47.8 (0.22)	5.96 (0.39)
	BE-40	28.4 (1.29)	39.2 (2.04)	49.5 (1.07)	5.71 (0.41)
	BM-40	26.7 (0.22)	39.0 (1.73)	46.1 (0.10)	6.35 (0.17)

Pour la classe 30 MPa, les valeurs de la résistance en compression des différents bétons sont équivalentes aux échéances de 3 et 7 jours. A 28 jours, les valeurs restent relativement proches et conformes à la classe de résistance visée, même si la valeur du BM est sensiblement plus faible (-6.4%) que celles des autres mélanges. Pour la classe 40 MPa, les valeurs de résistance en compression sont aussi similaires pour les différents bétons et pour toutes les échéances. A 28 jours, les résistances obtenues sont conformes à la classe de résistance visée même si on observe une valeur un peu plus élevée pour le béton BE (+ 3.6%) et une valeur un peu plus faible pour le béton BM (- 3.6%) par rapport au béton de référence BR. Ainsi, pour les deux classes de résistance,

la résistance à la compression et sa cinétique paraissent peu affectées par la substitution du sable naturel par le sable calcaire concassé (Figure 2).

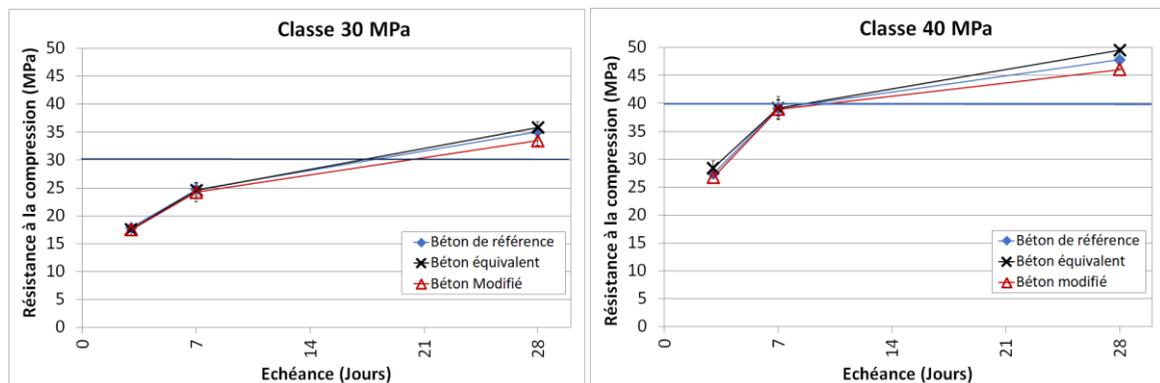


FIGURE 2. Evolutions de la résistance à la compression pour les classes 30 et 40 MPa

Les valeurs des résistances à la flexion des trois types de béton sont du même ordre de grandeur pour chaque classe de béton. Néanmoins, compte tenu de la faible valeur de l'écart type, les écarts peuvent être relativement significatifs. Ainsi, le BM se distingue par les valeurs les plus fortes, soit 10.7% et 6.5% supérieures à celles du béton de référence BR respectivement pour la classe 30 MPa et la classe 40 MPa. Le BE se caractérise par une résistance plus élevée que celle du béton de référence pour la classe 30 MPa (+7.2%) mais plus faible pour la classe 40 MPa (- 4.2%). Cette analyse comparative montre que la résistance à la flexion peut être globalement maintenue par le remplacement total du sable naturel par le sable concassé, voire même améliorée avec le sable concassé qui présente une nature minéralogique et une distribution granulométrique plus favorables.

D'autre part, pour évaluer l'effet des différents types de sable sur la microstructure des bétons, des observations au MEB, couplées à des analyses EDS, ont été menées pour les bétons de la classe 30 MPa. Les morceaux étudiés ont été prélevés aléatoirement au sein des éprouvettes de béton testées en compression après 28 jours de cure humide, puis emballées jusqu'à la date de l'observation au MEB pour limiter les modifications microstructurales. La figure 3 illustre des exemples de ces observations à l'interface pâte-granulat pour le béton de référence BR et le béton équivalent BE. Les microfissures observées peuvent être dues à la fracture durant l'essai de la résistance à la compression et à la préparation des échantillons pour le MEB. Cette figure ainsi que les analyses EDS montrent que les grains du sable siliceux du BR paraissent moins adhérents à la pâte que les grains de sable calcaire, quelle que soit l'origine de cette décohésion, qui est, de toute manière, identique aux deux bétons étant donné que tous les échantillons ont subi les mêmes conditions jusqu'à l'analyse MEB. De plus, les grains du sable siliceux du BR sont entourés par une couche de portlandite lisse. Dans le BE, la surface plus rugueuse du sable calcaire et sa minéralogie associée au phénomène d'épithaxie favorisent une meilleure adhérence entre la pâte et le granulat, un constat conforme avec les résultats donnés par certains travaux de recherche antérieurs (Struble et al. 1980). De plus, pour ce béton, on observe peu de portlandite et une meilleure continuité aux interfaces. Ces observations tendent à prouver que la substitution totale

du sable naturel siliceux par du sable concassé calcaire améliorerait la qualité de l'interface pâte-granulat dans le béton, même si cette amélioration n'a pas engendré une différence au niveau des propriétés mécaniques macroscopiques des bétons.

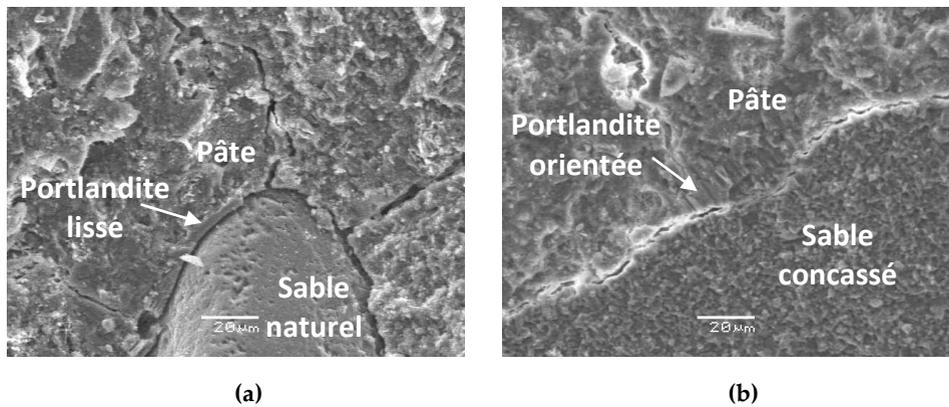


FIGURE 3. Images MEB (x800) pour la classe 30 MPa des 2 types de béton (a) : BR et (b) : BE

IV. CONCLUSION

Cette étude analyse l'effet de la substitution totale du sable naturel siliceux par du sable concassé calcaire de carrière sur les résistances à la compression et à la flexion de différentes classes de béton, afin de limiter la dépendance du secteur de la construction du Liban à la qualité et la disponibilité du sable naturel et afin de réduire l'impact environnemental lié à son extraction.

Deux classes de béton ont été étudiées, 30 et 40 MPa, et, pour chaque classe, trois formulations ont été évaluées. Pour une classe donnée, les formulations se caractérisent par un même dosage en ciment, un même rapport Eau efficace/Ciment et les mêmes proportions en gravillons, et ne diffèrent que par le type de sable et la quantité de superplastifiant qui est adaptée pour atteindre un même affaissement. Le béton de référence, béton actuellement utilisé au Liban, contient des proportions équivalentes de sable naturel siliceux et de sable concassé calcaire de carrière pour respecter le fuseau de la norme ASTM C33. Le béton équivalent comporte uniquement le sable concassé calcaire préparé à granulométrie identique à celle de la combinaison sable du béton de référence. Le béton modifié comprend le sable concassé calcaire préparé pour obtenir une granulométrie bien distribuée.

Pour les deux classes, les résultats montrent qu'il est possible d'obtenir les classes de résistance visées quel que soit le type de béton et que les résistances à la compression et à la flexion sont peu affectées par le type de sable, bien que les sables diffèrent par leurs minéralogies, formes granulaires, granulométries et propriétés physiques. L'observation de ces bétons au MEB montre une meilleure qualité de l'interface pâte-granulat, dans le cadre des bétons avec uniquement du sable concassé calcaire. Par conséquent, le remplacement total du sable naturel siliceux par du sable concassé calcaire, dont la granulométrie respecte le fuseau défini par la norme ASTM C33, peut être considéré comme une solution pertinente par rapport à la problématique de l'exploitation du sable naturel au Liban. L'étude se poursuit pour évaluer les propriétés de durabilité et des propriétés mécaniques supplémentaires de ces bétons, afin de consolider cette première analyse et définir des préconisations pour l'industrie du béton au Liban.

REMERCIEMENTS

Cette recherche est financée par la société ACTS-Beyrouth ; l'auteur remercie l'ensemble de son personnel pour son support technique et financier. L'auteur est reconnaissant envers le LMDC-Toulouse pour sa contribution à l'analyse des données et pour l'assistance technique.

REFERENCES

ASTM C33 (2016), Standard Specification for Concrete Aggregates, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM C39 (2017a), Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimen, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

ASTM C78 (2016), Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

ASTM C117 (2013), Standard Test Method for Materials Finer than 75 μm (No.200 Sieve) in Mineral Aggregates by Washing, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

ASTM C127 (2014), Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014.

ASTM C128 (2015), Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

ASTM C192 (2016a), Standard Test Method for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

Donza, H., Cabrera, O., & Irassar, E. F. (2002), High-Strength Concrete with Different Fine Aggregate, *Cement and Concrete Research*, 32, 1755–1761.

Hamad, B.S., Yassine, M.Y., & Khawlie M.R. (1996), A Survey Study on Geology and Location of Major Sand Resources in Lebanon, Eastern Mediterranean. *Bulletin of International Association of Engineering Geology-Paris*, 53.

Stefanidou, M. (2016), Crushed and River-Origin Sands Used as Aggregates in Repair Mortars, *Geosciences*, 6(2), 23. <https://doi.org/10.3390/geosciences6020023>.

Struble, L. & Skanly, J. (1980). A review of the cement-aggregate bond. *Cement and concrete research* (10), 277-286.

Yamei, H., & Lihua, W. (2017), Effect of Particle Shape of Limestone Manufactured Sand and Natural Sand on Concrete, *Procedia Engineering*, 210, 87–92, edited by 6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, PROTECT2017, Guangzhou (Canton), China,11-12.