

Réutilisation de coproduits coquilliers marins dans des bétons auto-plaçants pour des récifs artificiels

Héctor Cuadrado^{*1,2}; Nassim Sebaibi¹; Mohamed Boutouil¹; Bertrand Boudart²

¹ Ecole Supérieure d'Ingénierie et des Travaux de la Construction de Caen (ESITC Caen), 14610 Epron, France

² Normandie Université, UCBN, LUSAC, EA 4253, Site Universitaire, 50130 Cherbourg-Octeville, France

* hector.cuadrado@esitc-caen.fr

RESUME: En raison d'une nécessité de valorisation de coproduits coquilliers marins dans la région de Basse-Normandie, France, des bétons fluides contenant des coquilles concassées en remplacement des granulats naturels ont été incorporées pour la fabrication des modules de formes complexes constituant les récifs artificiels. L'objectif de ces travaux de recherche est l'étude de l'influence de la substitution des granulats naturels par des coquilles de pétoncle concassées sur les propriétés rhéologiques d'un béton auto-plaçant (BAP). A cet égard, quatre bétons ont été préparés ; un béton témoin et trois bétons dont sa matrice granulaire a été remplacée par des pétoncles concassées à 20, 40 et 60% afin de mesurer les propriétés de mobilité, la capacité de remplissage, la viscosité, la cohésion, le risque de blocage et de ségrégation ainsi que les propriétés mécaniques.

ABSTRACT: Due to a need of reusing marine by-products (seashells) in the region of Lower Normandy, self-compacting concretes containing crushed shells replacing the natural aggregates are suitable for the manufacture of complex shaped modules constituting artificial reefs. The objective of this paper is to study the influence of the substitution of natural aggregates by crushed scallop shells on the rheological properties of self-compacting concrete (SCC). For this purpose, four concretes were prepared; one of them used as the control concrete and three concretes incorporating crushed queen scallops at 20, 40 and 60% (substitution of natural aggregates); to measure the properties of mobility, the filling capacity, the viscosity, the cohesion, the risk of blockage and segregation, and the mechanical properties.

MOTS-CLÉS : béton, auto-plaçant, granulats, coquilles, propriétés à l'état frais

KEYWORDS: concrete, self-compacting, aggregates, seashells, fresh properties

1. INTRODUCTION

Un récif artificiel est une structure immergée et placée intentionnellement sur le fond marin pour imiter certaines caractéristiques et fonctions d'un récif naturel [1]. Le béton, un des matériaux les plus utilisés pour la fabrication des récifs artificiels en raison de sa composition chimique et de sa texture similaire aux récifs naturels, est un composite cimentaire qui ne se dégrade pas rapidement, qui est compatible avec l'environnement marin, moulable et chimiquement stable dans l'eau de mer [2]. La complexité de la forme des récifs est l'une des caractéristiques des récifs naturels; elle favorise la diversité d'espèces [3]. Les bétons auto-plaçants (BAP) s'avèrent des matériaux intéressants pour le coulage de moules complexes où les moyens de vibration classiques ne sont pas efficaces.

Dans la région de Basse-Normandie, les tonnages capturés en coquille Saint-Jacques et du pétoncle oscillent autour de 15.760 tonnes (donné datant de l'année 2013) par an [4], ce qui place ainsi la région en première position productrice de coquillages. Cette production génère des déchets pour lesquels la préoccupation est grandissante et dans ce contexte que s'inscrit la présente étude qui est de valoriser les coproduits coquilliers dans une matrice cimentaire.

Des bétons ordinaires [5, 6] et des bétons poreux [7] ont été réalisés avec succès en remplaçant une partie des granulats naturels par des coquilles de pétoncles concassées. L'objectif de ces travaux de recherche est d'étudier la faisabilité de produire des bétons autoplaçants (très fluides) à base de coquilles de pétoncles concassées.

La caractérisation de la mobilité et de la capacité de remplissage des BAPs se fait avec l'essai classique au cône d'Abrams [8], de façon à classer le béton selon différentes catégories: SF1, SF2 ou SF3 (Tableau 1), car le diamètre d'étalement est proportionnel au seuil de cisaillement en considérant le béton comme un fluide de type Bingham [9]. La viscosité apparente et la cohésion des BAPs peuvent être évaluées à partir des temps d'écoulement au cône d'Abrams ; T_{50} correspondant au temps d'étalement égal à 50 cm (classes VS1 et VS3, Tableau 1) et T_f correspondant au temps d'étalement final. En général, plus ces derniers sont élevés, plus le béton a une forte viscosité et cohésion. EFNARC [10] suggère des valeurs de T_{50} de 3 à 7 secondes pour des ouvrages de travaux publics (TP) et de 2 à 5 secondes pour des travaux de bâtiment.

Tableau 1 : Classes de BAP concernant les propriétés à l'état frais [11].

Etalement (mm)	T_{50} (s)	Taux de remplissage	Pourcentage de laitance (%)
550-650 (SF1)	< 2 s (VS1)	$\geq 0,80$ avec 2 barres (PL1)	≤ 20 (SR1)
660-750 (SF2)		$\geq 0,80$ avec 3 barres (PL2)	≤ 15 (SR2)
760-850 (SF3)	≥ 2 s (VS3)		≤ 10 (SR3)

L'aptitude à l'écoulement des BAPs s'obtient avec l'essai de la boîte L ou L-Box [12]. Les temps mesurés dans la boîte L (T_{20} et T_{40} , correspondant aux distances 20 et 40 cm de la vanne) caractérisent la vitesse de flux du béton à travers des armatures. Néanmoins, ces temps sont représentatifs de la fluidité du béton que s'il n'existe pas des effets de blocage. Pour un béton ne présentant pas de blocage, il est recommandé $T_{20} < 1,5$ s et $T_{40} < 2,5$ s [13]. Le coefficient de blocage ($CB = H_2/H_1$) est un bon indicateur de la capacité de passer à travers des ouvertures étroites, dont la déformabilité et la résistance au blocage (classes PL1 et PL2, Tableau 1). La ségrégation des BAPs est évaluée avec l'essai de la stabilité au tamis [14] en classant les bétons selon SR1, SR2 ou SR3 (Tableau 1). La valeur limite autorisée au tamis ne peut en aucun cas être supérieure à 30 % [15].

2. MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

2.1. MATERIAUX DE BASE

Un ciment Portland type CEM I 52,5 R PM a été utilisé, avec 97% de clinker et 3% de fine calcaire de type L, en plus d'un fine calcaire de haute pureté supplémentaire (carbonates totaux égale à 98,6%). La finesse Blaine du ciment et du fine calcaire est de 3930 et 4560 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, respectivement.

Un superplastifiant haut réducteur d'eau à base de polycarboxylates compatible avec le ciment utilisé [16] a été ajouté aux bétons à un dosage de 1,5% par rapport à la masse de ciment (0,38% d'extrait sec) pour apporter une meilleure ouvrabilité à l'état frais du béton. La Figure 1 contient les courbes granulométriques du ciment et du fine calcaire obtenues par granulométrie laser. Suivant cette figure on peut observer la correction granulaire apportée par les fines calcaires en diminuant le volume des vides intergranulaires du mélange. A cet effet, la compacité du mélange fine calcaire (FC)–ciment (CEM) en présence du superplastifiant a été mesurée (Figure 2) selon la méthode basée sur l'essai de consistance normale pratiqué en cimenterie [17]. Cet essai mesure la pénétration verticale d'une sonde de $\varnothing 10$ mm dans la pâte fraîche. La teneur en eau pour déterminer une compacité des fines (FC + CEM) à $K = 4,8$ correspond au dosage d'eau pour lequel la sonde s'enfonce à 6 mm du fond du moule [18]. Selon la Figure 2, la compacité maximale est obtenue avec une proportion de 70% (FC) et 30% (CEM) mais afin de ne dépasser une quantité d'additions de 250 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [19] la proportion finalement utilisée dans les bétons est égal à 39–61.

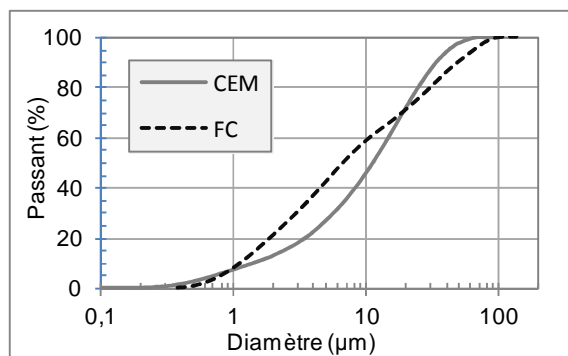


Figure 1 : Analyse granulométrique du ciment (CEM) et du fine calcaire (FC).

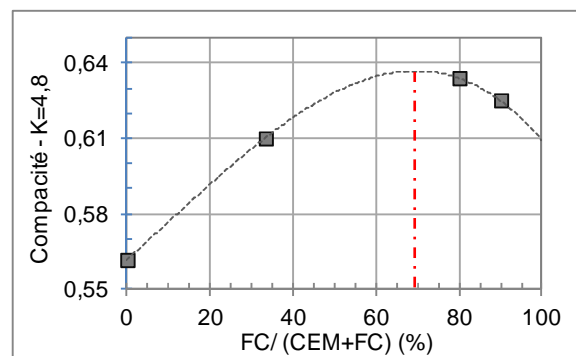


Figure 2 : Compacité du fine calcaire (FC) et du ciment (CEM).

Un gravier concassé d'origine quartzitique (GC) de fraction 4/10 mm, un sable concassé d'origine feldspathique (SC) de classe granulaire 0/4 mm et un sable roulé d'origine siliceux (SR) de fraction 0/2 mm ont été utilisés pour la composition des BAPs avec et sans coquilles. Le remplacement du squelette de référence par des coquilles concassées de type pétoncle a été fait par deux fractions de tailles maximales différentes, P5 et P2 avec une granulométrie de 0/5 mm et 0/2 mm respectivement, afin d'obtenir un meilleur arrangement granulaire. Le Tableau 2 donne les propriétés physiques des granulats naturels et des coquilles de pétoncles concassées, à savoir, la classe granulaire de chaque granulat, la masse volumique absolue [20], le coefficient d'absorption d'eau [20] et la compacité de chaque granulat selon l'essai de compacité à la table de secousses proposé par LCPC [21].

Tableau 2 : Propriétés physiques des granulats.

	GC	SC	SR	P5	P2
Classe granulaire (mm)	4/10	0/4	0/2	0/5	0/2
Masse volumique absolue (kg.m ⁻³)	2691	2690	2643	2635	2639
Coefficient d'absorption (%)	0,7	1,4	0,1	3,65	3,84
Compacité à la table de secousses (K=9)	0,599	0,684	0,661	0,539	0,602

2.2. FORMULATION DES BETONS AVEC ET SANS COQUILLES

La formulation des bétons est basée sur l'optimisation du squelette granulaire afin d'obtenir les proportions des granulats donnant un volume minimum d'espaces intergranulaires. Des essais sur la pâte cimentaire sont réalisés pour optimiser le dosage d'adjuvants et d'une approche itérative pour établir la quantité de pâte nécessaire pour un béton auto-plaçant témoin favorable avec des propriétés répondent à un étalement au cône d'Abrams supérieur à 70 cm, un taux de remplissage au boite « L » supérieur à 95% et une résistance moyenne en compression à 28 jours supérieure à 40 MPa.

Le squelette granulaire a été optimisé selon la méthode d'empilement granulaire (MEG) en vérifiant que la courbe granulométrique résultante est similaire au modèle modifié d'Andreasen and Andersen [22] qui est donné par l'équation suivante :

$$P(D) = \frac{D^q - D_{\min}^q}{D_{\max}^q - D_{\min}^q} \quad (1)$$

où : « P(D) » est le passant du tamis avec une ouverture « D », « D_{min} » est la taille minimale des particules, « D_{max} » est la taille maximale et le coefficient de forme « q » est égal à 0,37.

Une première approche avait été effectuée en partant sur un béton dont la matrice granulaire était exclusivement constituée de granulats concassés afin que la substitution par des coquilles concassées soit faite par des granulats plus similaires. Ces bétons n'ont pas obtenu les caractéristiques de fluidité souhaitées en raison d'un arrangement granulaire très faible, malgré un squelette granulaire optimisé et une quantité de pâte très élevée (supérieure à 480 l.m⁻³) pour obtenir une fluidité qui n'était pas satisfaisante (étalement inférieure à 550 mm) et qui provoquait une perte d'homogénéité des bétons. En partant de ces essais préliminaires, un sable roulé a été incorporé pour améliorer la compacité granulaire, minimiser les vides intergranulaires et faciliter l'écoulement à l'état frais du béton. Pour les bétons contenant des coquilles, le remplacement des granulats naturels par des coquilles a été optimisé avec la MEG et l'aide du logiciel RénéLCPC. Le Tableau 3 contient les valeurs de compacité obtenues pour les mélanges granulaires de chaque béton. On constate que l'ajout des coquilles perturbe l'arrangement granulaire à des substitutions supérieures à 20%. La Figure 3 présente la courbe granulométrique des squelettes granulaires correspondants aux bétons dans laquelle on peut observer l'éloignement par rapport à la courbe idéale d'Andreasen and Andersen (notée A&A) des mélanges granulaires contenant des coquilles concassées.

Les proportions des constituants des bétons sont détaillées dans le Tableau 4 ; à noter un dosage en superplastifiant de 1,5% par rapport à la masse du ciment et un rapport eau effective sur fines égal à 0,35. Une quantité d'eau supplémentaire a été ajouté pour saturer l'absorption d'eau des granulats naturels et des pétoncles concassés.

Tableau 3 : Compacité des squelettes granulaires des bétons.

Taux de pétoncles	Expérimental (K=9)
0%	0,714±0,001
20%	0,722±0,002
40%	0,701±0,002
60%	0,679±0,003

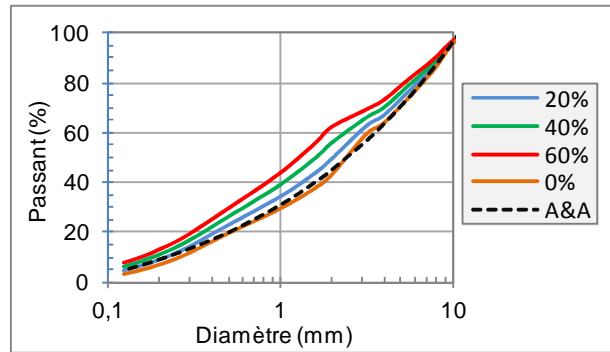


Figure 3 : Courbes granulométriques des squelettes granulaires des bétons.

Tableau 4 : Composition des BAPs ($kg.m^{-3}$).

	0%	20%	40%	60%
Ciment	360	360	360	360
Fines calcaires	230	230	230	230
Superplastifiant	5,4	5,4	5,4	5,4
Eau	219	226	232	237
Gravier concassé	527	453	391	327
Sable concassé	753	476	230	0
Sable roulé	226	214	207	196
Pétoncle 5 mm	0	100	193	275
Pétoncle 2 mm	0	186	359	510

2.3. METHODES EXPERIMENTALES

Trois gâchées ont été préparées pour chaque formulation de béton pour lesquelles l'étalement au cône d'Abrams (voir Figure 4) [8], a été mesuré sur chaque gâchée. L'air occlus des bétons a été mesuré par la méthode du manomètre avec un aéromètre de 8L [23], le test à la boîte L (voir Figure 5) a été réalisé pour le cas le plus défavorable avec trois barres en acier nervurées de 12 mm de diamètre espacées 41 mm [12] et l'essai de stabilité au tamis en mesurant la masse du béton qui s'écoule à travers un tamis d'ouvertures carrées de 5 mm [13].

Les propriétés mécaniques ont été évaluées par l'essai de compression uniaxiale [24] sur des éprouvettes cylindriques de dimensions 110x220 mm après 28 jours de cure dans une chambre à 20°C et à 80-95% HR.



Figure 4 : Test d'étalement au cône d'Abrams.



Figure 5 : Test du blocage à la boîte L

3. RESULTATS

3.1. AIR OCCLUS

L'ajout des pétoncles concassés a entraîné une augmentation de l'air occlus des bétons. Même si la formulation initiale à base des coquilles avait prévue une teneur en air plus élevée pour les formulations contenant des coquilles la teneur finale obtenue a été systématiquement plus élevée que prévue pour tous les cas (Figure 6). Le BAP témoin a une teneur d'air occlus de 2,3% et de 4,8%, 9,0% et 12,5% pour les formulations contenant 20%, 40% et 60% de coquilles, respectivement. En raison d'une teneur en air plus élevée que prévue, les dosages réels des constituants par m³ de béton durci sont réduits. Au lieu d'une quantité de 360 kg.m⁻³ de ciment, les quantités sont réduites à 358,1; 356,3; 351,8 et 351,1 kg.m⁻³ de ciment pour les BAPs avec 0%, 20%, 40% et 60% respectivement. Néanmoins, cette réduction est négligeable par rapport aux effets sur les propriétés étudiées. Par contre, les teneurs élevées en air occlus vont influencer fortement les propriétés rhéologiques, physiques et mécaniques.

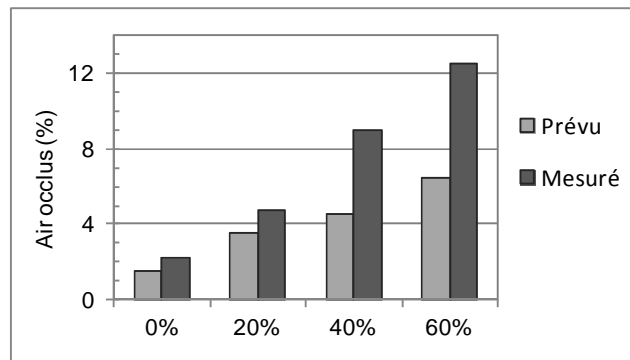


Figure 6 : Air occlus prévu et air occlus mesuré des BAPs.

3.2. ETALEMENT AU CONE D'ABRAMS

L'étalement des BAPs est réduit à cause des coquilles, et pourtant, la mobilité et la capacité de remplissage des BAPs avec des coquilles sont inférieures à celles du béton témoin (Figure. 7). Une substitution des granulats naturels par des coquilles concassées de 60% donne un béton non auto-plaçant car le diamètre d'étalement est inférieur à 55 cm; sinon, une diminution d'environ 10 cm par chaque 20% de substitution de granulats est observée. Le béton témoin est classé SF3 avec un étalement de 80 cm, le béton contenant 20% de substitution SF2, et celui à 40% SF1. Concernant le temps d'écoulement (Figure. 8), on observe que la vitesse de déformation du béton témoin est très rapide en arrivant au diamètre final dans un temps inférieur à 2 s. Les compositions avec des remplacements de 20% et 40% donnent un comportement similaire en temps d'écoulement à 50 cm à savoir 1,8 et 2,1 s respectivement et en restant en mouvement pendant une durée élevée jusqu'au diamètre final. Comme le diamètre final du béton à 60% était égal à 51 cm, la différence entre les deux temps n'est pas appréciée.

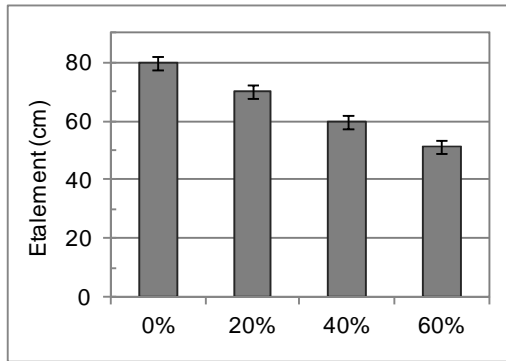


Figure 7 : Étalement au cône d'Abrams.

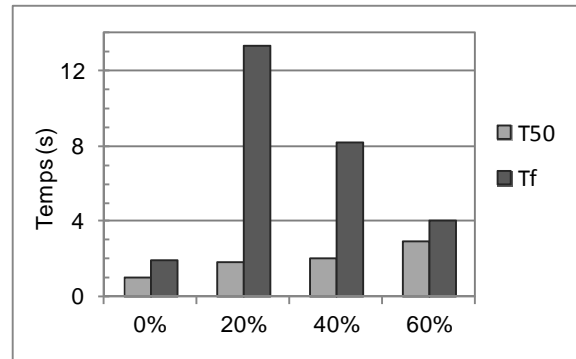


Figure 8 : Temps d'écoulement T₅₀ et T_f.

3.3. ECOULEMENT A LA BOITE L

Le coefficient de blocage (CB) est affecté par l'incrément des coquilles concassées; le béton témoin et le béton avec 20% de substitution traversent les trois barres correctement (CB>90%) tandis que pour des substitutions supérieures à 20% le blocage est évident (CB<70%) (Figure. 9). Pour ces dernières formulations (40% et 60%) la viscosité et la cohésion des bétons sont trop élevées. Concernant le temps nécessaire pour atteindre une distance de 20 cm (T₂₀) et de 40 cm (T₄₀) à partir de la barrière d'armatures, on observe un comportement cohérent aux résultats cinétiques obtenus par le cône d'Abrams. On constate un incrément général du temps en mouvement des bétons en augmentant le taux de substitution de granulats naturels par des pétoncles. Néanmoins, les formulations contenant 20% et 40% s'écoulent très rapidement au début puis la vitesse d'écoulement est réduite sans s'arrêter pendant une durée plus longue (Figure 10).

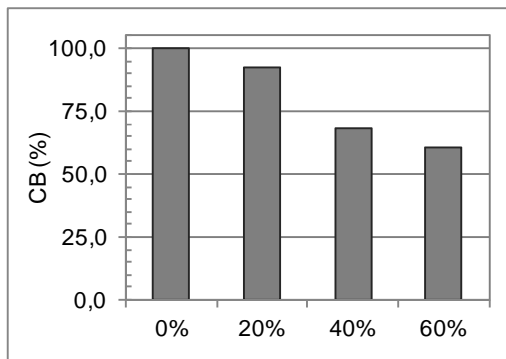


Figure 9 : Coefficient de blocage à la boîte L avec 3 barres.

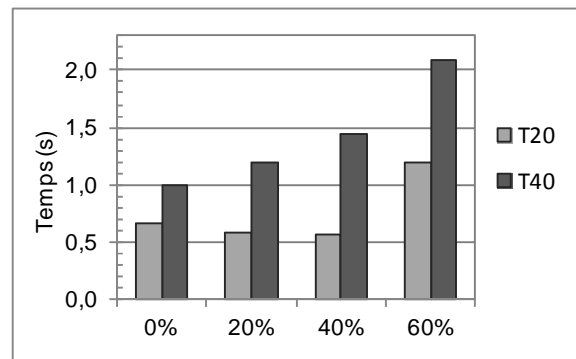


Figure 10 : Temps d'écoulement T₂₀ et T₄₀ à la boîte L.

3.4. SEGREGATION DE LA PATE DES BETONS

Les résultats de ségrégation des bétons montrent une diminution de la quantité de laitance, masse du béton qui s'écoule à travers du tamis, en présence de coquilles concassées (Tableau. 5). Liée à l'effet de stabilisation de bulles d'air occlus dans le béton et à la diminution des propriétés rhéologiques, mobilité et capacité de remplissage, la cohésion de la pâte de béton augmente avec la teneur en coquilles. Une augmentation de la substitution de granulats naturels par des coquilles concassées réduit fortement la fluidité du béton en le rendant moins fluide.

Tableau 5 : Ségrégation des bétons.

Taux de coquilles	0%	20%	40%	60%
Pourcentage de laitance (%)	6,6	2,6	0,4	0,0

3.5. RESISTANCE EN COMPRESSION

La résistance en compression des BAPs contenant des coquilles à 28 jours affichent une réduction des propriétés mécaniques tout en augmentant le taux de substitution de granulats naturels par des pétoncles concassés (Figure 11). Cette diminution, qui représente une chute de 32% pour le béton contenant 60% de coquilles (33,4 MPa) par rapport au béton témoin (49,2 MPa), peut être produite principalement par le volume des bulles d'air occlus qui augmentent la porosité des bétons en le rendant moins performant.

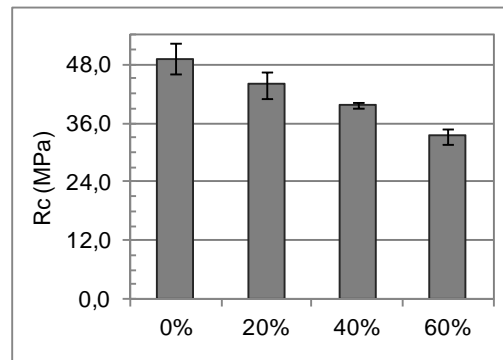


Figure 11 : L'évolution de la résistance en compression par rapport aux taux de substitutions.

4. CONCLUSIONS

L'objectif de cet article était d'étudier l'influence de la substitution des granulats naturels par des coquilles de pétoncle concassées sur les propriétés à l'état frais et à l'état durci d'un béton auto-plaçant. Les résultats des tests ont conclu:

- La forme des pétoncles concassés affecte la compacité et l'arrangement du mélange granulaire.
- La formulation des bétons est fortement influencée par l'arrangement granulaire de ses constituants donc il est conseillé d'étudier la compacité des constituants individuellement et dans l'ensemble.
- Les pétoncles concassés modifient les propriétés rhéologiques du béton et stabilisent la formation de bulles d'air occlus. Des fortes teneurs en air occlus sont obtenues avec des taux élevés de substitution.
- La fluidité du béton est réduite en augmentant la teneur en coquilles à cause d'une augmentation de la viscosité et de la cohésion du béton. Pour les mêmes raisons, des taux élevés de substitution montrent des problèmes de blocage en présence d'armatures.
- La ségrégation est réduite en présence des coquilles à cause de la perte des propriétés auto-plaçantes du béton.
- Les propriétés mécaniques sont aussi réduites avec une augmentation du taux de substitution de granulats, probablement liée à l'augmentation de la porosité des bétons (air occlus).

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent remercier les cofinanceurs, FEDER et la Région Basse Normandie, ainsi que les partenaires du projet RECIF pour leur soutien.

Le projet RECIF a été sélectionné dans le cadre du programme Européen de coopération transfrontalière INTERREG IV A France (Manche) / Angleterre, cofinancé par le FEDER.

REFERENCES

1. Convention et Protocole de Londres / PNUE, *Directives pour l'implantation de récifs artificiels*, Londres, Royaume-Uni
2. B.K. Walker, B. Henderson et R.E. Spieler, *Fish assemblages associated with artificial reefs of concrete aggregates or quarry stone offshore Miami Beach, Florida, USA*, *Aquat. Living Resour.* 15 (2002) 95-105
3. M.H. Carr et M.A. Hixon, *Artificial reefs: The importance of comparisons with natural reefs*, *Fisheries* 22 (1997) 28-33
4. NFN, *NF La pêche en Normandie*, Normandie Fraîcheur Mer (2014), <http://www.normandiefraicheurmer.fr/la-peche-en-normandie/category-12-coquillages.html> (vu 12/09/2014)
5. C. Engclare Robillard, *Etude de valorisation des coproduits marins coquilliers sous forme d'additions et de granulats dans les matériaux cimentaires*, Ph. D. Université de Caen Basse Normandie (2012)
6. H. Cuadrado, N. Sebaibi, M. Boutouil et B. Boudart, *Physical properties and mechanical behaviour of concrete made with crushed queen scallop shells*, *Proceedings of the international symposium on environmentally friendly concrete - ECO-Crete*, Reykjavik, Islande
7. D.H. Nguyen, N. Sebaibi, M. Boutouil, L. Leleyter et F. Baraud, *The use of seashell by-products in pervious concrete pavers*, *International Journal of Civil Science and Engineering* 7 (2013) 385-392
8. AFNOR, *NF EN 12350-8 : Essais pour béton frais : Béton auto-plaçant – Essai d'étalement au cône d'Abrams*, Association Française de Normalisation (2010), Saint-Denis La Plaine, France
9. T. Sedran, *Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants*, Ph. D. Ecole Nationale des Pont et Chaussées (1999)
10. EFNARC, *The European Guidelines for Self-Compacting Concrete*, Groupe de travail : EFNARC, BIBM, CEMBUREAU, ERMCO et EFCA (2005)
11. AFNOR, *NF EN 206-9 : Béton : Règles complémentaires pour le béton auto-plaçant*, Association Française de Normalisation (2010), Saint-Denis La Plaine, France
12. AFNOR, *NF EN 12350-10 : Essais pour béton frais : Béton auto-plaçant – Essai à la boîte en L*, Association Française de Normalisation (2010), Saint-Denis La Plaine, France
13. P.J.M. Bartos et M. Grauers, *Self-Compacting Concrete*, *Concrete* 33 (4) (1999) 09-13
14. AFNOR., *NF EN 12350-11 : Essais pour béton frais : Béton auto-plaçant – Essai de stabilité au tamis*, Association Française de Normalisation (2010), Saint-Denis La Plaine, France
15. AFGC, *Recommandations pour l'emploi des bétons auto-plaçants*, Association Française de Génie Civil (2008), Paris, France
16. AFNOR, *P 18-358 : Adjuvants pour bétons, mortiers et coulis – Mesure de la fluidité et de la réduction d'eau*, Association Française de Normalisation (1985), Saint-Denis La Plaine, France

17. AFNOR, *NF EN 196-3 : Méthodes d'essais des ciments – Détermination du temps de prise et de la stabilité*, Association Française de Normalisation (2009), Saint-Denis La Plaine, France
18. A. Lecomte, J.M. Mechling et C. Diliberto, *Indice de serrage des pâtes de consistance normale*, Septième édition des Journées scientifiques de regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (2006), Toulouse, France
19. M. Burón, J. Fernández et L. Garrido, *Hormigón autocompactante. Criterios para su utilización*, Hormigón 887 (2006) 52-64
20. AFNOR, *NF EN 1097-6 : Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau*, Association Française de Normalisation (2014), Saint-Denis La Plaine, France
21. LCPC, *Méthode d'essai des I_{pc} n°61: Essai de compacité des fractions granulaires à la table à secousses*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (2004), Paris Cedex 15, France
22. H.J.H. Brouwers et H.J. Radix, *Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study*, Cement and Concrete Research 35 (2005) 2116-2136
23. AFNOR, *NF EN 12350-7 : Essais pour béton frais : Teneur en air – Méthode de la compressibilité*, Association Française de Normalisation (2012), Saint-Denis La Plaine, France
24. AFNOR, *NF EN 12390-3 : Essais pour béton durci : Résistance à la compression des éprouvettes*, Association Française de Normalisation (2012), Saint-Denis La Plaine, France