

Etude expérimentale et numérique des propriétés mécaniques et thermiques de bétons de co-produits coquilliers

Camille Martin--Cavaillé¹

¹Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France

RESUME Dans le but de limiter l'impact environnemental des constructions, des sous-produits d'autres industries peuvent être incorporés au béton. En particulier, les déchets coquilliers de l'aquaculture peuvent être utilisés en remplacement des granulats. Les recherches menées jusqu'à présent ont montré que ces nouveaux bétons peuvent atteindre des propriétés mécaniques suffisantes pour être porteurs mais leurs propriétés élastiques et thermiques ont été peu étudiées et peu modélisées. Cette étude vise à mieux comprendre le comportement mécanique et thermique des bétons de co-produits coquilliers afin de tendre vers une optimisation des formulations. Pour cela, des bétons ayant un taux de substitution volumique de 50 % des gravillons par des coquilles d'huitres concassées ont été formulés et étudiés. Dans le but d'expliquer leurs comportements, une campagne expérimentale a été menée pour obtenir les paramètres d'élasticité et de thermiques des granulats et des coquilles d'huitres. Puis une homogénéisation a été faite par la méthode de Mori-Tanaka. Les résultats montrent que le comportement élastique des bétons est principalement dicté par la phase poreuse des coquilles et que le comportement thermique est meilleur à cause d'une plus faible conductivité thermique des coquilles.

Mots-clefs Co-produits coquilliers, Conductivité thermique, Eco-matériaux, Homogénéisation, Nano-indentation

I. INTRODUCTION

Dans le monde, 5,1 millions de tonnes d'huitres sont produites chaque année dont 80 000 tonnes en France (Agreste, 2021). Une fois consommées, les coquilles constituent des déchets calcaires qu'il est possible de valoriser dans les bétons. Les premiers résultats montrent que l'utilisation de ces co-produits en granulats dans les bétons conduit à de bonnes propriétés mécaniques (Eo et Yi, 2015), suffisantes pour formuler un béton porteur jusqu'à 50 % de taux de substitution volumique. De plus, les coquilles sont constituées d'un assemblage de couches denses et poreuses superposées les unes aux autres, les phases poreuses représentant environ 30 % du volume total des coquilles (Martin--Cavaillé *et al.*, 2022). Cette porosité additionnelle pourrait mener à de meilleures propriétés isolantes. Cependant, les recherches réalisées se concentrent souvent sur la résistance mécanique des bétons, leur comportement mécanique et hygrothermique ayant été peu étudié (Mo *et al.*, 2018). L'objectif de cette étude est de comprendre le comportement mécanique et thermique des bétons de co-produits coquilliers afin de tendre vers une optimisation des formulations. Les

propriétés élastiques et thermiques intrinsèques des coquilles et des granulats naturels ont d'abord été mesurées. Puis, des bétons ayant un taux de substitution volumique de 50 % des gravillons par des coquilles d'huitres ont été formulés. Enfin, une homogénéisation a été effectuée grâce à la méthode de Mori-Tanaka. La Fig.1 présente le schéma de principe de l'étude.

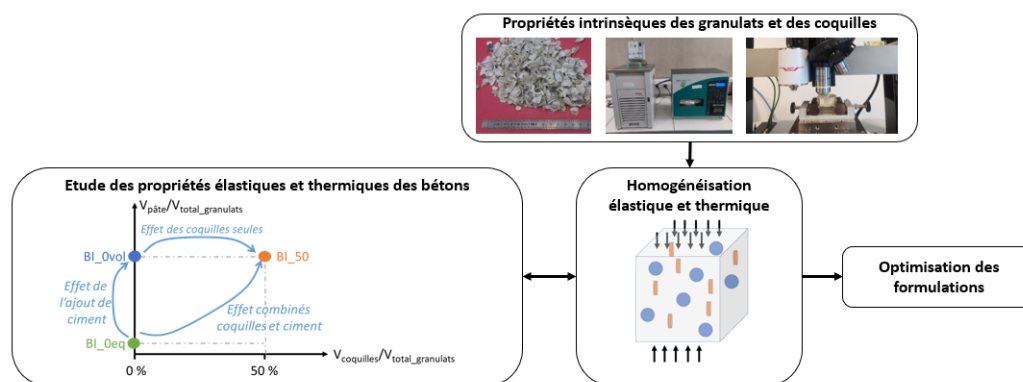


FIGURE 1. Schéma de principe de l'étude réalisée

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux bruts

Les matériaux bruts utilisés dans cette étude sont du ciment CEM I 52,5N, du sable silico-calcaire, des granulats naturels roulés silico-calcaires (GN) et des coquilles d'huitres concassées (GH). Les propriétés physiques des granulats sont présentées dans le tableau 1. Les coquilles (Fig. 2-a) ont une forme particulière en forme d'ellipse aplatie par rapport aux granulats GN (Fig. 2-b). Afin de mieux connaître la granulométrie des GN et GH, trois mesures ont été effectuées : l'une par tamisage classique (NF 933-1), la deuxième selon la RILEM TC 236-BBM (Amziane *et al.* 2017) et la troisième par mesure au pied à coulisse des trois dimensions caractéristiques des GH. Les résultats présentés en Fig. 2-c montrent tout d'abord qu'en utilisant la méthode de tamisage classique, les granulats GN et GH ont apparemment la même granulométrie 4/10 mm. Cependant, l'étude au pied à coulisse a mis en avant les trois dimensions caractéristiques de GH : une longueur d'environ 10.5 mm, une largeur d'environ 9 mm et une épaisseur d'environ 2 mm. Le diamètre équivalent à l'aire (EAD) est bien inclus entre la largeur et la longueur.



FIGURE 2. Présentation des granulats utilisés. a/ Coquilles d'huitres concassées (GH), b/ Granulats classiques (GN), c/ Etude granulométrique comparative de GH et GN

TABLEAU 1. Propriétés physiques des granulats de référence GN et des coquilles GH

	Granulométrie (mm)	Masse volumique en vrac (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Coefficient d'absorption (%)
Norme	NF EN 933-1	NF EN 1097-3	NF EN 1097-6	NF EN 1097-6
Sable	0/2	1464	2625	1,79
GN	4/10	1531	2677	2,85
GH	4/10	809	2512	6,20

B. Formulations des bétons

Un premier béton utilisant 50 % de GH à la place des GN (noté BI_50) ainsi qu'un béton équivalent sans coquilles (noté BI_0eq) ont été formulés avec une résistance mécanique visée de 33 MPa à 28 jours et un affaissement visé de 11 cm. Ceci a conduit à augmenter le ratio Volume de pâte/Volume de granulats ($V_{pâte}/V_{gra}$) dans BI_50 par rapport à la référence BI_0eq. Ainsi, pour pouvoir distinguer l'effet des coquilles et l'effet de l'ajout de pâte de ciment, une référence volumique BI_0vol dans laquelle le ratio $V_{pâte}/V_{gra}$ est gardé constant a été formulée. Les bétons BI_50 et BI_0vol partagent donc le même mortier noté MI_vol. Dans toutes les formulations, l'impact de l'absorption d'eau par les granulats GN, GH et par le sable ont été compensés. Les formulations ainsi que les propriétés à l'état frais des bétons sont présentées en tableau 2. La compacité de l'arrangement granulaire des bétons prenant en compte uniquement les granulats GR, GH et le sable et mesurée selon la méthode LCPC 61 y est également présentée. Des éprouvettes Ø11x22 cm et 7x7x28 cm ont été fabriquées, démoulées à 3 jours et conservées en conditions endogènes.

TABLEAU 2. Formulations des bétons

Formulation (kg/m ³)	BI_0eq	BI_0vol	BI_50
Ciment CEM I	350	366	366
Granulats de référence (GN)	1013	988	494
Granulats d'huitre (GH)	0	0	464
Sable	718	701	701
Eau_efficace E_{eff}	209	218	218
E_{eff}/C	0,6	0,6	0,6
$V_{pâte} / V_{granulats(GN+GH)}$	0,92	0,98	0,98
Affaissement (cm)	11,3	16,50	11,1
Air occlus (%)	2,2	1,5	4,5
Compacité de l'arrangement granulaire (%)	65	65	76

À l'état frais, BI_0eq et BI_50 ont bien un affaissement similaire autour de 11 cm, ce qui correspond au cahier des charges. En revanche BI_0vol a un affaissement beaucoup plus élevé : ainsi la présence de coquilles d'huîtres tend à diminuer l'affaissement des formulations de béton. Cela peut s'expliquer par un effet combiné de la forme des granulats et par une augmentation de la friction dû à l'état de surface des GH (Mo et al., 2018). De plus, la quantité d'air occlus augmente dans BI_50 ainsi que la compacité de l'arrangement granulaire (ce qui signifie que l'arrangement granulaire est moins compact). Cette augmentation du pourcentage d'air occlus peut s'expliquer en partie par cette augmentation de compacité mais aussi par un potentiel effet entraineur d'air des coquilles.

C. Méthodes de mesures des propriétés intrinsèques des granulats de référence et des coquilles

Afin d'expliquer les propriétés des bétons observées, les propriétés intrinsèques élastiques et thermiques des granulats et des coquilles ont été mesurées.

Nano-indentation. Le module d'Young des granulats GN et GH a été mesuré à l'aide d'un nano-indenteur Antoon Paar muni d'une pointe Berkovitch. Les granulats ont été polis puis 50 points de mesure ont été pris dans la phase poreuse des GH, la phase dense des GH et dans les GN. Pour chaque point, la pointe a été enfoncée d'environ 1 µm avec un effort de 10 à 20mN.

Mesure de conductivité thermique sur granulats. Une mesure de conductivité thermique apparente des GN et GH a été effectuée dans un Fluxmètre Lambda HFM 446. Le dispositif expérimental est présenté en Fig. 3. Les granulats sont placés en vrac dans un moule en polystyrène (14x14x5 cm). Deux mesures sont effectuées : une sur granulats secs et l'autre pour une teneur en eau de 2,5% (mesurée par une balance dessicatrice Proviteq MB25 avant et après l'essai) afin de quantifier l'impact de la teneur en eau sur la conductivité thermique des granulats.

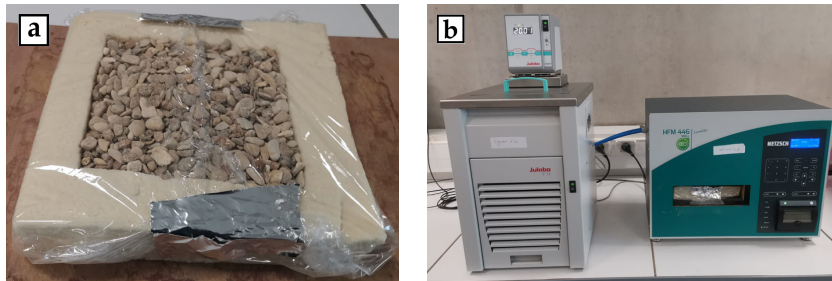


FIGURE 3. Dispositif de mesure de la conductivité thermique des granulats en vrac.
a/ Mise en place des granulats dans le moule, b/ Fluxmètre Lambda HFM 446

Deux méthodes d'homogénéisation ont été utilisées pour remonter à la conductivité thermique intrinsèque des granulats λ_{gra} à partir de la conductivité thermique mesurée en vrac λ_{vrac} en prenant en compte la conductivité thermique de l'air λ_{air} , la fraction volumique de granulats f_{gra} et d'air f_{air} . La première méthode (équation (1)) utilise la moyenne des bornes d'Hashin-Shtrikman (HS) (Hashin and Shtrikman, 1963). La deuxième méthode (équation (2)) utilise un modèle auto-cohérent (AC) qui convient à l'étude des granulats désordonnés (Mercier and Molinari, 2009). Dans les deux cas, les granulats sont assimilés à des sphères isotropes dans un milieu continu isotrope. Lorsque les granulats ne sont pas à l'état sec, la conductivité thermique du granulat incluant l'effet de l'eau absorbée est calculée en supposant qu'il n'y a pas d'eau entre les granulats.

$$\lambda_{vrac}^{HS} = \frac{\lambda_{inf} + \lambda_{sup}}{2}, \lambda_{sup} = \lambda_{gra} + \frac{3 f_{air} \lambda_{gra} (\lambda_{air} - \lambda_{gra})}{3 \lambda_{gra} + f_{gra} (\lambda_{air} - \lambda_{gra})}, \lambda_{inf} = \lambda_{air} + \frac{3 f_{gra} \lambda_{air} (\lambda_{gra} - \lambda_{air})}{3 \lambda_{air} + f_{air} (\lambda_{gra} - \lambda_{air})} \quad (1)$$

$$\lambda_{vrac}^{AC} = \lambda_{gra} \left(1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \left(\frac{\lambda_{air}}{\lambda_{gra}} - 1 \right)^{-1}} \right), \theta = 1 - f_{gra} \quad (2)$$

D. Méthodes de caractérisation des bétons

Propriétés mécaniques. La résistance en compression, le module d'Young et le coefficient de Poisson des bétons ont été obtenus par compression de trois éprouvettes Ø11x22 cm à l'aide d'une cage extensométrique (avec des extensomètres verticaux et horizontaux) et d'une MTS 500 kN (NF-

EN-12390-3 et NF-EN-12390-13). Leur résistance en traction a été obtenue par essai de flexion 3 points sur trois éprouvettes 7x7x28 cm à l'aide d'une Instron 50 kN. Les essais ont été réalisés après 7, 28, 90 et 180 jours de cure endogène.

Propriétés thermiques. Les conductivités thermiques des bétons ont été mesurées à l'aide d'un Lambda HFM 436 par méthode fluxmétrique sur des éprouvettes 30x30x7 cm. Les essais ont été réalisés après 6 mois de cure endogène dans deux conditions : après un stockage à 20 °C/50%HR et après séchage jusqu'à masse constante.

E. Homogénéisation du comportement mécanique et thermique des bétons

Les paramètres intrinsèques mesurés sur granulats ont été utilisés comme paramètres d'entrée pour modéliser le comportement élastique et thermique des bétons formulés à l'aide du schéma d'homogénéisation de Mori-Tanaka (Mori and Tanaka, 1973) qui convient à l'étude des matériaux composites dont l'une des phases peut être clairement identifiée comme la matrice (Mercier and Molinari, 2009). Dans ce modèle, la matrice (le mortier) et les inclusions (les granulats GH et GN) sont considérés comme isotropes. Les GN sont considérés sphériques et les GH sont considérés sphériques dans un premier temps puis ayant une forme de palets ayant tous la même orientation. La prise en compte de cette forme intervient à travers les tenseurs d'Eshelby S_i^E et de dépoliarisation S_i qui ne dépendent que de la forme de l'inclusion et des propriétés de la matrice (Mura, 1987) (Huang *et al.*, 2022).

Homogénéisation des propriétés élastiques. Le tenseur de rigidité C_{hom} homogénéisé d'un matériau avec une matrice (de tenseur de rigidité C_m et fraction volumique f_m) et des inclusions i (de tenseur de rigidité C_i et fraction volumique f_i) est calculé selon les équations (3) et (4).

$$C_{hom} = C_M + \sum_{i=1}^N f_i (C_i - C_M) \cdot A_i^{MT} \quad (3)$$

$$A_i^{MT} = [I + P_i : (C_i - C_M)]^{-1} : [f_m I + \sum_{i=1}^N f_i [I + P_i : (C_i - C_M)]]^{-1} \text{ avec } P_i = S_i^E : C_M \quad (4)$$

Homogénéisation des propriétés thermiques. De même, le tenseur de conductivité thermique λ_{hom} d'un matériau contenant une matrice (de conductivité thermique $\lambda_M = \lambda_0$ et fraction volumique $f_M = f_0$) et des inclusions i (de conductivité thermique λ_i et fraction volumique f_i) est calculé selon les équations (5) et (6).

$$\lambda_{hom} = \sum_{i=0}^N f_i \lambda_i A_i^{MT} \quad (5)$$

$$A_i^{MT} = [I + P_i (\lambda_i - \lambda_0)]^{-1} : (\sum_{i=0}^N f_i [I + P_i (\lambda_i - \lambda_0)]^{-1})^{-1} \text{ avec } P_i = S_i : \lambda_M^{-1} \quad (4)$$

III. PROPRIETES INTRINSEQUES DES GRANULATS ET DES COQUILLES

A. Propriétés élastiques mesurées par nano-indentation

Les résultats de nano-indentation sont présentés en Fig. 4-a : ils montrent que le module d'Young de GH dépend fortement de la phase testée : le module d'Young de la phase dense est en moyenne de 45 GPa contre 15 GPa dans la phase poreuse. Ceci s'explique par la plus faible quantité de matière présente dans la phase poreuse car les deux phases sont constituées du même matériau. En revanche, le module d'Young des granulats a été mesuré aux alentours de 55 GPa soit plus élevé que la phase dense des coquilles. Les résultats présentent tout de même une grande variabilité.

B. Conductivité thermique

La Fig. 4-b présente les résultats de conductivité thermique intrinsèque des granulats après identification par le schéma d'Hashin-Shtrikman (HS) et le schéma auto-cohérent (AC) en fonction de la teneur en eau des granulats. Les résultats montrent que les coquilles GH ont une conductivité thermique 30% plus faible que celle des granulats. Les résultats montrent également une grande importance de la teneur en eau car une variation de la teneur en eau de 2,5 % mène à des variations de conductivité thermique de 37 % à 43 % sur les conductivités thermiques des granulats. Les deux schémas d'homogénéisation conduisent à des écarts dans l'estimation de la conductivité thermique des granulats pouvant aller jusqu'à 45%. Le schéma AC conduit à estimer de plus faibles conductivités thermiques des granulats par rapport au schéma HS. Le choix du schéma le plus adapté sera fait grâce aux résultats d'homogénéisation.

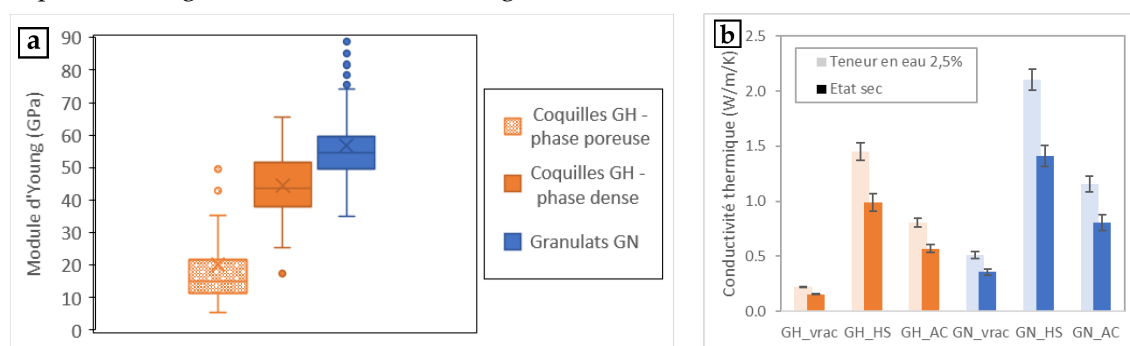


FIGURE 4. Propriétés intrinsèques des GN et GH. a/ Module d'Young obtenus par nano-indentation, b/ Conductivité thermique identifiée par la méthode d'Hashin Strikman (HS) et Autocohérente (AC)

IV. ETUDE EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT DES BETONS DE COQUILLES

A. Propriétés mécaniques

L'évolution des propriétés mécaniques des bétons est présentée en Fig. 5. La présence de 50 % de coquilles fait diminuer la résistance en compression de BI_0vol de 9 % pour un ratio V_{pate}/V_{gra} fixé. BI_50 semble suivre la même évolution que BI_0vol et BI_0eq : il n'y a donc pas d'effet retard dû à la présence de coquilles. La résistance en traction par flexion est similaire entre BI_0eq et BI_0vol mais diminue entre 6 % et 20 % dans BI_50 par rapport à BI_0vol. Les écarts-types de mesure sont d'environ 10 %, donc ces résultats sont à relativiser. La présence de coquilles fait diminuer le coefficient de Poisson entre 4 % à 20 %. La diminution des résistances mécaniques peut être due à la différence entre les résistances des GN et des GH ou à une plus faible cohésion entre les coquilles et la matrice cimentaire. Les observations de (Bourdote *et al.*, 2021) semblaient montrer une bonne cohésion apparente entre la matrice et les coquilles mais les propriétés d'interface peuvent diminuer. Pour le module d'Young, BI_0eq et BI_0vol ont des modules similaires alors que celui de BI_50 a diminué de 35 %. Cette diminution est cohérente avec les résultats obtenus montrant que les GH ont un plus faible module d'Young que les GN. Cependant d'autres facteurs pourraient également intervenir comme le fait que les GH aient une forme différente des GN et que celles-ci peuvent s'arranger différemment dans les bétons. Une modélisation est nécessaire pour réussir à distinguer ces différentes hypothèses.

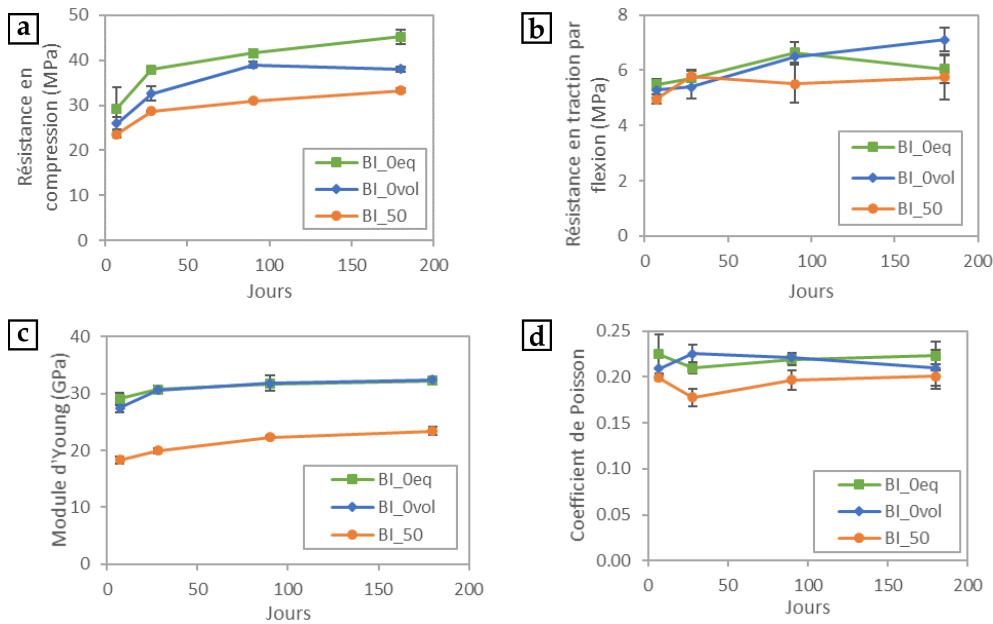


FIGURE 5. Evolution des propriétés mécaniques des bétons au cours du temps. a/ Résistance en compression, b/ Résistance en traction par flexion, c/ Module d'Young, d/ Coefficient de Poisson

B. Thermique

Le tableau 3 présente un résumé des mesures de conductivité thermique des bétons (à 20°C/50%HR et à l'état sec) et des granulats en lien avec leur masse volumique à l'état sec. Les résultats montrent bien que les conductivités thermiques des bétons augmentent en présence d'eau. A l'état sec, la conductivité thermique de BI_50 diminue de 25 % par rapport à BI_0vol. En revanche, la conductivité thermique de BI_0vol augmente de 7 % par rapport à celle de BI_0eq. Cela peut être dû à l'augmentation de la quantité de mortier entre les deux formulations. L'augmentation de la conductivité thermique entre le mortier et BI_0vol fait penser que les granulats GN doivent avoir une conductivité thermique supérieure à celle du mortier et la diminution de la conductivité thermique de BI_50 fait penser que les coquilles GH doivent avoir une conductivité thermique inférieure. Cependant, les résultats obtenus sur GH et GN montrent que la conductivité thermique des GN est probablement sous-estimée par la méthode de mesure. En effet, la masse volumique des GN est 20% plus grande que celle de MVI_vol mais sa conductivité thermique estimée est 4% plus faible. La répétition des mesures sur deux éprouvettes de BI_50 a aussi permis de montrer que l'écart-type de mesure pour une même formulation était de 0.08 W/m/K. Pour vérifier que cette différence de conductivité thermique sur les bétons est bien dû à la différence de conductivités thermiques sur les granulats une modélisation est nécessaire.

TABLEAU 3. Conductivités thermiques et masses volumiques des matériaux. Les masses volumiques de GH et GN sont obtenues par la NF EN 1907-6 et leurs conductivités thermiques par le schéma HS.

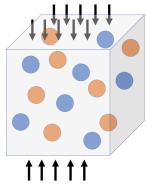
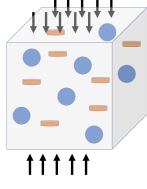
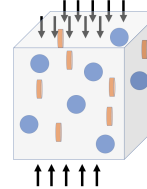
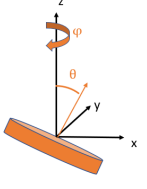
	BI_0eq	BI_0vol	BI_50	MI_vol	GN	GH
Conductivité th. - 20°C, 50% (W/m/K)	1.96	2.11	1.57	1.88	/	/
Conductivité th. - Etat sec (W/m/K)	1.81	1.70	1.34	1.47	1.41	0.99
Masse volumique – Etat sec (kg/m³)	2130	2079	1951	1946	2477	2092

V. HOMOGENEISATION DU COMPORTEMENT DES BETONS COQUILLIERS

A. Comportement élastique

Les paramètres variables de simulation choisis sont présentés dans le tableau 4 : il s’agit du module d’Young de GH, de la forme de GH et de l’orientation de GH. L’ordre de grandeur du module d’Young du mortier a été identifié en fonction du module d’Young de BI_0vol à 24 GPa. La mesure expérimentale sur éprouvette 4x4x16 cm a donné un module d’Young pour MI_vol de 44 GPa. Cette différence peut être expliquée car la mesure sur éprouvette 4x4x16 cm ne respecte pas la théorie des poutres d’Euler-Bernoulli et le module d’Young est alors surestimé d’un facteur 2 environ.

TABLEAU 4. Paramètres variables pour GH et schémas des géométries associées (GN bleu, GH orange)

Paramètre variable pour GH	E_{GH}	Forme de GH et Orientation de GH		
Forme GN	Sphère	Sphère	Sphère	Sphère
Forme GH	Sphère	Palet	Palet	Palet
Orientation	/	Perpendiculaire	Parallèle	Tous angles
E_{GN} (GPa)	55	55	55	55
E_{GH} (GPa)	15 ou 45	55 ou 15	55 ou 15	15
Schéma				

Les résultats sont présentés en Fig. 6 : ils montrent que le facteur le plus influent sur le module d’Young des bétons est le module d’Young des coquilles. Ainsi, le module d’Young de BI_50 diminue de 22 % par rapport à BI_0vol en supposant que le module d’Young des GH est de 15 GPa. L’impact de la forme des GH est très faible (environ 1 %). De même, l’impact de l’orientation de GH sur le module d’Young est très faible : environ 0,1 % en supposant que toutes les GH ont la même orientation dans le béton. Or dans le béton, les GH prennent en réalité toutes les orientations possibles. Ainsi si la répartition de l’orientation est aléatoire, le module d’Young obtenu sera borné par les cas extrêmes (palets parallèles ou perpendiculaires) ce qui diminuera davantage l’impact de l’orientation des palets sur le module d’Young des bétons. Ces résultats sont compatibles avec ceux de (Beddaa *et al.*, 2022) qui avaient montré que si l’on ne considère pas de zone d’interface entre les granulats et la pâte de ciment, l’impact de la forme des granulats est très réduit. Les résultats semblent indiquer que lorsqu’une coquille est sollicitée, la sollicitation des phases poreuses contrôle la réponse globale de la coquille à cause de la différence de raideur entre les phases denses et les phases poreuses. De plus, les déformations dans les bétons testés au pic sont d’environ 0,3 % alors que 30% des coquilles sont constituées de phases poreuses. Cependant, même en considérant que toute la coquille réagit comme si son module d’Young était celui de la phase poreuse, cela ne suffit pas à atteindre le point expérimental. Pour expliquer cela, il pourrait exister une zone d’interface entre les coquilles et la pâte cimentaire avec des propriétés mécaniques plus faibles et le module d’Young de la phase poreuse pourrait aussi être surestimé par nano-indentation.

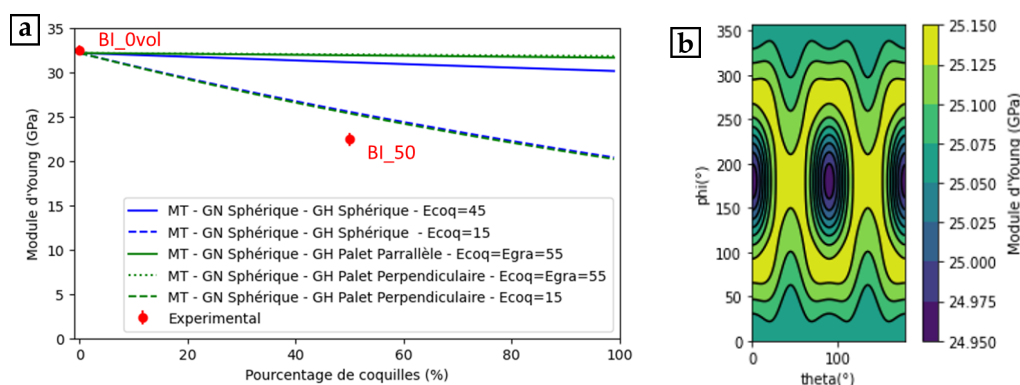


FIGURE 6. Impact des coquilles sur le module d'Young des bétons. a/ Impact des paramètres de simulation, b/ Impact de l'orientation des palets pour 50 % des GN remplacés par GH

B. Homogénéisation des conductivités thermiques des bétons

L'homogénéisation des conductivités thermiques des bétons est effectuée en supposant que tous les constituants sont secs. La Fig. 7 présente les résultats obtenus par homogénéisation en faisant varier à la fois la conductivité thermique des GH et GN (calculés selon le schéma HS ou AC) et la forme des coquilles ainsi que leur orientation. Les calculs sont tout d'abord effectués à partir des résultats expérimentaux. Puis une simulation a été faite en recalant la valeur de la conductivité thermique des granulats pour coller aux résultats expérimentaux.

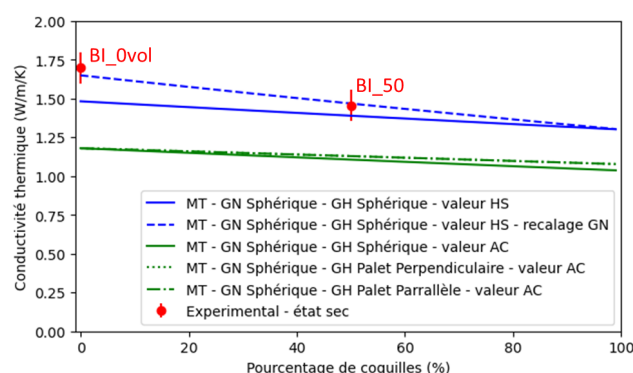


FIGURE 7. Conductivités thermiques des bétons en fonction de la forme des GH et du schéma utilisé pour calculer les propriétés intrinsèques de GH et GN (HS=Hashin-Shtrikman et AC=auto-cohérent)

Les résultats montrent que les valeurs de conductivité thermique calculées par le schéma HS permettent d'obtenir des résultats par homogénéisation plus proches des résultats expérimentaux que celles obtenues par le schéma AC. Ce résultat semble cohérent avec les masses volumiques des matériaux obtenues. Les résultats montrent aussi que l'impact de la forme des GH ou de leur orientation sur la conductivité thermique des bétons est très faible (moins de 1 %). Afin de recalibrer les résultats de modélisation avec les résultats expérimentaux, la conductivité thermique des GN à l'état sec a été estimée à 2,4 W/m/K. Ainsi, la diminution de la conductivité des bétons en présence de coquilles peut-être en partie expliquée par la plus faible conductivité des GH. En revanche, à cause des incertitudes de mesure il n'est pas possible de savoir ici si d'autres facteurs comme un potentiel effet entraineur d'air dû à la forme des coquilles interviennent.

VI. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude présentée a permis de comprendre le comportement élastique et thermique des bétons incorporant des co-produits coquilliers grâce à une campagne expérimentale et numérique. La mesure des paramètres intrinsèques des granulats a permis de fournir des données d'entrée pour une modélisation par homogénéisation. Il a été montré que le comportement élastique des bétons coquilliers dépend fortement du comportement de la phase poreuse des coquilles. Le comportement thermique des bétons est en grande partie dû aux propriétés thermiques des coquilles mais la modélisation n'a pas permis de savoir si un autre facteur intervenait.

Ce travail pourrait être complété en prenant en compte l'effet de la zone interfaciale autour des granulats et des coquilles avec la pâte cimentaire. L'objectif, ensuite, serait de modéliser d'autres paramètres comme la résistance mécanique des bétons de coquilles, leurs propriétés hygriques et leurs propriétés de durabilité pour aller vers une optimisation des formulations.

REFERENCES

- Agreste (Ed.), 2021. Enquête Aquaculture 2020 | Agreste, la statistique agricole. SSP - Bureau des statistiques structurelles, environnementales et forestières.
- Beddaa, H., Lavergne, F., Ben Fraj, A., Barthélémy, J.-F., Torrenti, J.-M., 2022. Experimental investigation and micromechanical modeling of mechanical and durability properties of concrete based on shells from sediments. *Cement and Concrete Composites* 133, 104684. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104684>
- Bourdot, A., Martin--Cavaillé, C., Vachet, M., Honorio, T., Sebaibi, N., Bennacer, R., 2021. Microstructure and durability properties of concretes based on oyster shell co-products. Presented at the 75th Rilem Annual Week, Merida, Mexico.
- Eo, S.-H., Yi, S.-T., 2015. Effect of oyster shell as an aggregate replacement on the characteristics of concrete. *Magazine of Concrete Research* 67, 833–842. doi.org/10.1680/mac.14.00383
- Hashin, Z., Shtrikman, S., 1963. A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 11, 127–140. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(63\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(63)90060-7)
- Huang, G., Abou-Chakra, A., Absi, J., Geoffroy, S., 2022. Optimization of mechanical properties in anisotropic bio-based building materials by a multiscale homogenization model. *Journal of Building Engineering* 57, 104890. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104890>
- Martin--Cavaillé, C., Bourdot, A., Sebaibi, N., Bennacer, R., 2022. Microscopic and chemical characterization of seashell co-products for valorization in cementitious materials, in: 40ème Rencontres Universitaires de Génie Civil, Lille, France, pp. 383–386.
- Mercier, S., Molinari, A., 2009. Homogenization of elastic–viscoplastic heterogeneous materials: Self-consistent and Mori-Tanaka schemes. *International Journal of Plasticity* 25, 1024–1048. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2008.08.006>
- Mo, K.H., Alengaram, U.J., Jumaat, M.Z., Lee, S.C., Goh, W.I., Yuen, C.W., 2018. Recycling of seashell waste in concrete: A review. *Construction and Building Materials* 162, 751–764. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.009>
- Mori, T., Tanaka, K., 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica* 21, 571–574. [/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)
- Mura, T., 1987. *Micromechanics of Defects in Solids*. Springer Netherlands.