

Incorporation de granulats de béton recyclé ou récupéré dans les blocs de maçonnerie en béton

Suzanne Le Thierry¹, François Jacquemot¹

¹ Cerib, Centre d'Etudes et de Recherches de l'Industrie du Béton

ABSTRACT Les enjeux en lien avec l'économie circulaire orientent les prescripteurs vers des solutions constructives favorisant l'utilisation de matières premières issues du recyclage. Dans ce contexte, les produits en béton peuvent incorporer des granulats de béton recyclé (c'est-à-dire préalablement utilisé dans la construction) ou des granulats de béton récupéré (par lavage ou concassage de rebuts de béton internes à l'usine). L'utilisation de ces granulats (GBR) est ainsi un enjeu de premier ordre pour l'Industrie du Béton et participe aux évolutions nécessaires pour contribuer aux principes de l'économie circulaire.

Les recommandations issues du projet national Recybéton sont majoritairement destinées aux bétons relevant de la norme NF EN 206/CN et ne sont par conséquent pas directement applicables aux blocs de maçonnerie qui relèvent de la norme NF EN 771-3/CN. Les blocs représentent une part importante de la production de l'Industrie du Béton et offrent ainsi une voie de valorisation des sables, graves et gravillons recyclés non lavés.

Des travaux ont été menés par le Cerib et par les préfabricants afin de caractériser les granulats de béton recyclé et récupéré, en lien avec les performances attendues pour les blocs de maçonnerie. Des blocs fabriqués par les industriels contenant ces granulats ont également été caractérisés. La recherche menée porte sur des essais mécaniques et de durabilité qui ont permis de valider dans un premier temps l'incorporation jusqu'à 30 % de granulats de béton recyclé ou récupéré par rapport à la masse totale de granulats. Un essai simple de détermination de la teneur en sulfates des granulats a également été investigué. Ces travaux ont servi de base technique pour l'évolution du référentiel de certification de la marque NF Blocs de Maçonnerie qui intègre désormais la possibilité d'incorporer des granulats de béton recyclé ou récupéré.

Keywords blocs de maçonnerie, granulats de béton recyclé ou récupéré (GBR), gonflement sulfatique

I. INTRODUCTION

En 2017, les filières du bâtiment et des travaux publics ont produit 224 millions de tonnes de déchets, soit près de 70 % de l'ensemble des déchets produits en France (Ademe, 2020). 80 % de ces déchets sont des déchets inertes. Dans le cadre de la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGEC), le régime de la responsabilité élargie du producteur (REP) a été étendu aux produits et matériaux de construction du secteur du bâtiment à compter du 1er janvier 2022. A l'heure actuelle, les déchets inertes sont déjà recyclés ou valorisés à hauteur de 76%, essentiellement en sous-couche routière ou remblai. L'objectif est de recycler ou valoriser 90% de

ces déchets d'ici 2028. Dans l'objectif d'une transition vers une économie circulaire, il est nécessaire de travailler sur l'incorporation dans les bétons de granulats de béton recyclé issus de la démolition, mais également de granulats de béton récupéré (par lavage ou concassage de rebuts de béton internes à l'usine). L'utilisation de ces granulats permet de réduire le recours aux ressources naturelles non renouvelables pour la production des bétons.

Le projet national Recybéton, mené entre 2012 et 2018, a permis d'établir des recommandations pour l'utilisation des granulats recyclés (de Larrard et Colina, 2018). Néanmoins, ces recommandations sont majoritairement destinées aux bétons structurels relevant de la norme NF EN 206/CN et ne sont par conséquent pas directement applicables aux blocs de maçonnerie qui relèvent de la norme NF EN 771-3/CN.

En 2020, les blocs de maçonneries représentent près de 45 % en masse de la production de l'Industrie du Béton française (FIB, 2020). Il s'agit d'un produit essentiel qui offre une voie de valorisation importante pour les GBR. En outre, ne relevant pas de la norme NF EN 206/CN, ils permettent la valorisation de sables et de graves recyclés non lavés.

Les travaux menés dans le cadre de la présente étude ont visé à caractériser les GBR, en lien avec les performances attendues pour les blocs de maçonnerie. Des essais ont porté sur la production de blocs de maçonnerie à base de GBR en laboratoire et en usines afin d'évaluer l'influence de ces granulats sur les performances des blocs. L'influence de la teneur en sulfates des GBR sur le gonflement à long terme du béton a été évaluée. Enfin, un essai simple de détermination de la teneur en sulfates des GBR a été investigué.



FIGURE 1. Bloc de maçonnerie

II. ETAT DE L'ART

Jusqu'à présent, peu de travaux ont été publiés sur l'utilisation des GBR dans les blocs de maçonneries. Certains travaux ont montré que des blocs contenant des gravillons recyclés à hauteur de 30 % d'incorporation étaient conformes aux exigences normatives, moyennant une augmentation de 10 % de la teneur en ciment (Pimienta, 1996).

En dehors de leur impact sur la résistance mécanique du béton, une des limites à l'utilisation des GBR dans le béton réside dans leur teneur en sulfates qui est généralement plus élevée que celle des granulats naturels. Ces sulfates proviennent le plus souvent de débris de plâtre. Or, ces sulfates peuvent être à l'origine de gonflement sulfatique susceptible de provoquer des fissurations préjudiciables pour la maçonnerie (Orsetti, 1997). Le phénomène est amplifié à basse température avec la potentielle formation de thaumasite (Rougeau, 2018). Il est ainsi essentiel de maîtriser ces phénomènes et de contrôler la teneur en sulfates dans les GBR.

III. PRODUCTION DE BLOCS SUR PRESSE VIBRANTE ET CARACTERISATION DE CES BLOCS

Des blocs de maçonnerie ont été produits avec différents taux d'incorporation de GBR afin d'évaluer l'influence de ces granulats sur les caractéristiques des blocs. Des essais ont été menés sur la presse à blocs du Cerib mais également dans différentes usines de préfabrication.

A. Programme expérimental sur la presse à blocs du Cerib

Les caractéristiques des granulats utilisés pour les essais menés au Cerib sont détaillées dans le tableau 1. Les blocs témoins ont été produits avec des granulats naturels de nature calcaire. Des blocs ont ensuite été produits avec différents taux d'incorporation de GBR fournis par les industriels (ALKERN, CELTYS, POINT P, SEAC): 0 %, 30 %, 50 % ou 100 %. Les taux d'incorporation sont définis comme la masse de GBR par rapport au total des granulats de la formule. Les proportions de sable et de gravillons naturels sont ajustées en fonction de la granulométrie des GBR incorporés. Le dosage en ciment est maintenu constant entre les formules. La résistance en compression des blocs a été déterminée suivant la norme NF EN 772-1. Les résultats sont présentés sur la figure 3.



FIGURE 2. Presse vibrante du Cerib

TABLEAU 1. Caractéristiques des granulats

Référence	Nature des granulats	Coupe granulométrique	Densité	Coefficient d'absorption d'eau
GN	Naturels	0/4	2,66	0,4 %
		4/6	2,66	0,7 %
GBR 1	Recyclés	0/8	2,14	9,1 %
GBR 2	Récupérés	4/10	2,35	5,2 %
GBR 3	Récupérés	0/8	2,36	5,2 %

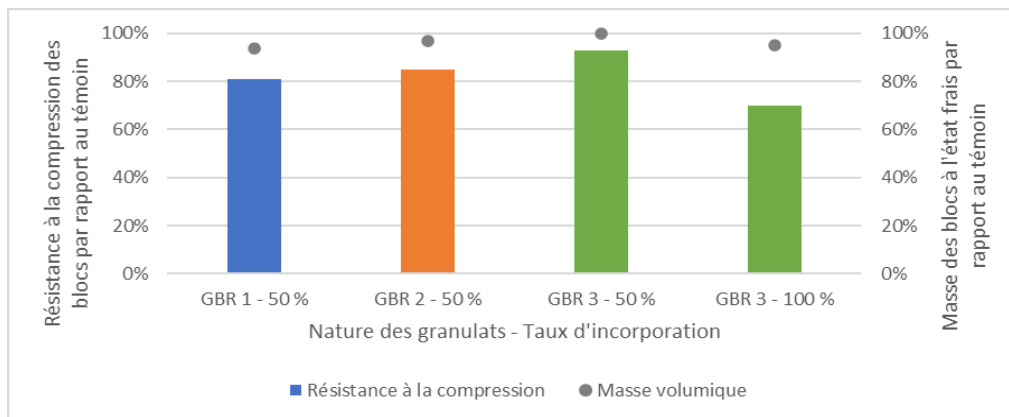


FIGURE 3. Résistance à la compression et masse à l'état frais des blocs de GBR par rapport aux blocs témoins

La résistance en compression des blocs contenant des GBR est systématiquement inférieure à celle des blocs de référence. Suivant les granulats utilisés, la perte de résistance est plus ou moins marquée. Les performances les plus faibles sont obtenus avec le GBR 1 qui présente la plus faible densité et le plus fort coefficient d'absorption d'eau. Les meilleures performances sont obtenues avec le GBR 3. La densité et le coefficient d'absorption d'eau de ces granulats sont proches de ceux du GBR 2. Les blocs obtenus ont cependant une masse plus élevée, potentiellement en raison d'une meilleure compacité du mélange.

B. Blocs produits en usine

Des blocs à base de GBR ont également été produits dans différentes usines de préfabrication (ALKERN et EDYCEM), avec des taux d'incorporation variant de 15 à 100 %. Le dosage en ciment est maintenu constant entre les formules d'une même usine. Les caractéristiques des granulats utilisés sont présentées dans le tableau 2. Les résistances en compression des blocs sont présentées sur le graphique de la figure 4 de façon comparative avec les blocs témoins (0 % d'incorporation). On notera que les blocs témoins considérés ne sont pas les mêmes d'un GBR à l'autre. En effet, les essais ont été menés dans des usines différentes pour chaque GBR et chaque série d'essai est comparée au témoin correspondant de l'usine concernée. Les essais de compression ont été réalisés à 7 jours sur 3 blocs pour chaque série.

TABLEAU 2. Caractéristiques des granulats

Référence	Nature des granulats	Coupure granulométrique	Densité	Coefficient d'absorption d'eau
GBR 3	Récupérés	0/8	2,36	5,2%
GBR 4	Récupérés	4/8	2,32	4,7%
GBR 5	Récupérés	0/4	2,37	4,9%
		4/8	2,32	4,7%
GBR 6	Recyclés	0/12,5	1,92	14,4%

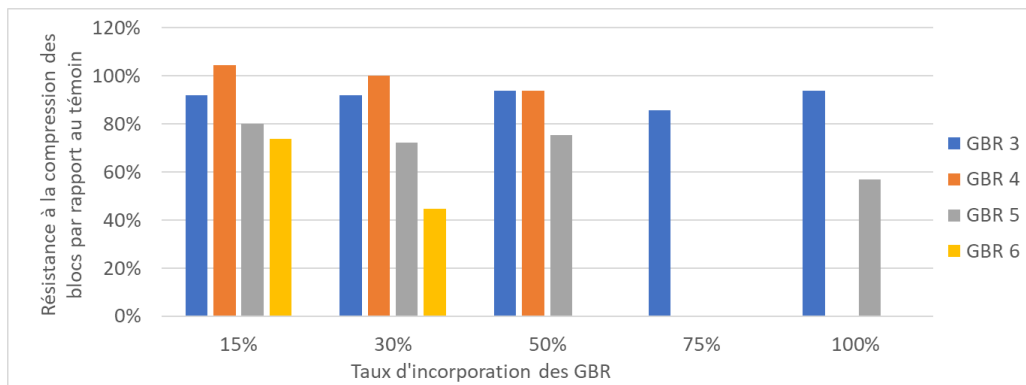


FIGURE 3. Résistance en compression des blocs de GBR produits en usine

De même que lors des essais menés en laboratoire, la résistance à la compression des blocs de GBR n'atteint généralement pas celle du témoin. Néanmoins, pour le GBR 4, la résistance en compression est maintenue pour des taux d'incorporation 15 % et 30 %. On note également que la résistance évolue peu avec le taux d'incorporation du GBR 3. A 100 % d'incorporation, la résistance est affectée de moins de 10 %. A l'inverse, la résistance en compression est réduite de plus de moitié avec 30 % d'incorporation du GBR 6, granulat de faible qualité. Ces résultats soulignent la disparité du comportement des GBR. On notera cependant qu'un travail d'optimisation des formules (compacité granulaire) et du process de vibro-compactage pourraient aboutir à une amélioration de certains résultats.

IV. EVALUATION DE L'INFLUENCE DE LA TENEUR EN SULFATES DANS LES GRANULATS SUR LE RISQUE DE GONFLEMENT A LONG TERME DU BETON

Afin d'évaluer l'influence de la teneur en sulfates dans les granulats sur le risque de gonflement à long terme du béton, des granulats naturels dont la teneur en sulfates est de 0,02 % ont été pollués artificiellement afin d'obtenir des échantillons de granulats de teneurs en sulfates de 0,3 %, 0,7 % et 1,2 %. Ces granulats ont été utilisés pour la production de bétons suivant des formules représentatives des bétons de blocs. Ces granulats pollués représentent l'ensemble des granulats de la formule. Des éprouvettes de dimensions 10 cm x 40 cm x 6 cm ont été fabriquées par vibro-compactage et ont été démoulées immédiatement. Ce mode de fabrication a pour objectif de se rapprocher au plus près du mode de production des blocs sur presse vibrante.

A 7 jours, des plots ont été collés sur ces éprouvettes pour des mesures de gonflement. Des éprouvettes ont été stockées dans l'eau à 20 °C et dans l'eau à 4 °C et leur gonflement a été mesuré à échéances régulières durant plusieurs mois. La composition minéralogique du ciment est présentée dans le tableau 3 et les mesures de gonflement sur les graphiques 5 et 6.

TABLEAU 3. Composition du ciment

C3S	C4AF	C3A	C2S
66 %	8 %	8 %	13 %

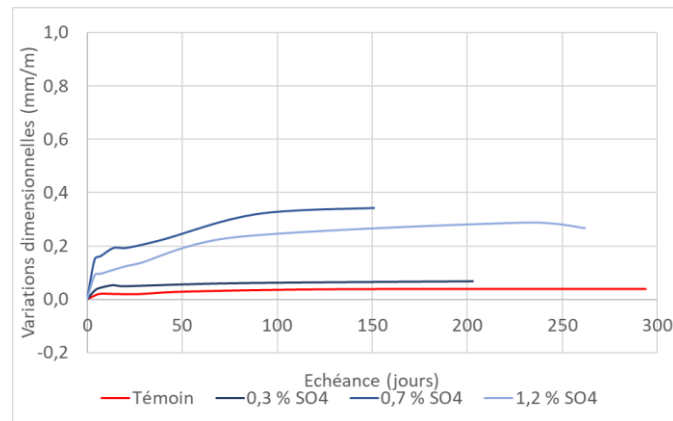


FIGURE 5. Evolution du gonflement des échantillons conservés dans l'eau à 20 °C

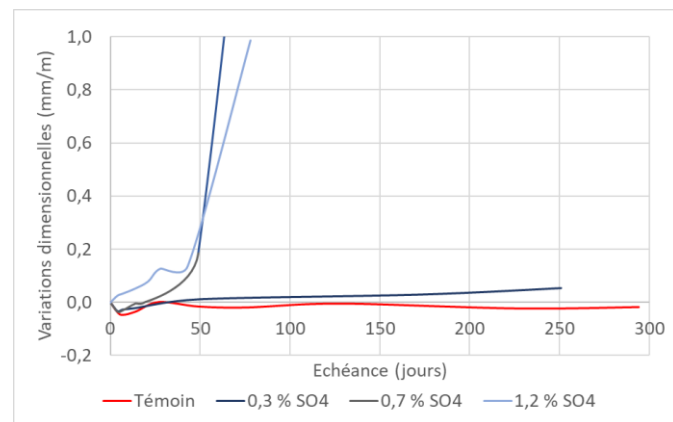


FIGURE 6. Evolution du gonflement des échantillons conservés dans l'eau à 4 °C

A titre indicatif, suivant la norme NF EN 771-3/CN relative aux spécifications des blocs de maçonnerie en béton, les variations dimensionnelles des blocs mesurées suivant la norme NF EN 772-14 (somme du retrait mesuré durant 21 à jours à 33 °C et du gonflement mesuré durant 4 jours dans l'eau à 20 °C) ne doivent pas dépasser 0,45 mm/m.

A 20 °C, on observe un gonflement des éprouvettes fabriquées avec les granulats à 0,7 et 1,2 % de sulfates. Ce gonflement est relativement limité (inférieur à 0,45 mm/m) et semble se stabiliser au-delà d'une centaine de jours.

A 4 °C, un gonflement très rapide se produit sur les éprouvettes fabriquées avec les granulats à 0,7 et 1,2 % de sulfates. Le gonflement dépasse en quelques mois plusieurs millimètre par mètre. Des analyses par diffraction des rayons X ont mis en évidence la présence d'ettringite et de thaumasite dans les échantillons concernés.

Aucun gonflement notable n'est détecté sur les éprouvettes de référence ni sur les éprouvettes contenant les granulats pollués à 0,3 % de sulfates.

En complément, les teneurs en sulfates mesurées sur 11 échantillons de GBR fournis par les industriels suivant la méthode de la norme NF EN 1744-1 sont présentées sur la figure 7(en

orange, 6 échantillons de granulats de béton récupéré ; en bleu, 7 échantillons de granulats de béton recyclé). Les valeurs sont comprises entre 0,09 % et 0,68 %. On constate que les teneurs en sulfates des granulats de béton récupéré sont globalement inférieures à celles des granulats de béton recyclé. Tous les échantillons de granulats de béton récupéré testés ont une teneur en sulfates inférieure à 0,3 %.

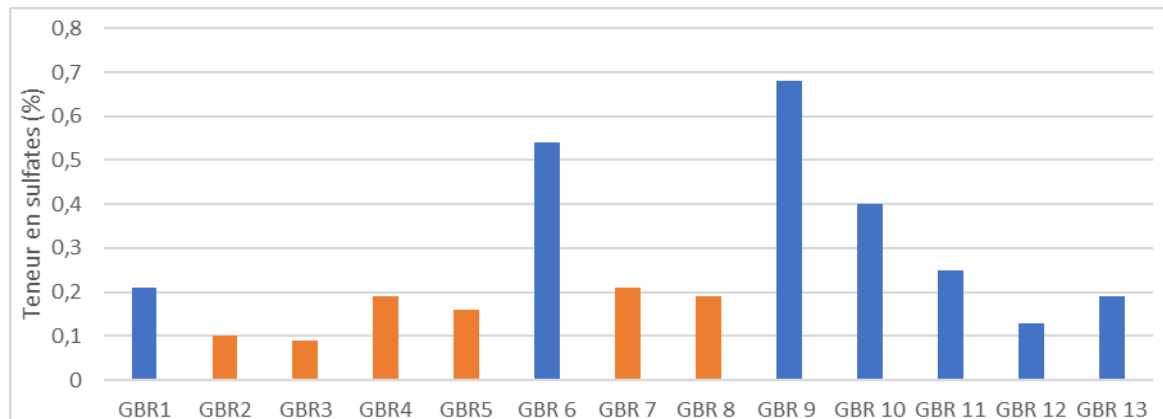


FIGURE 7. Teneur en sulfates de 11 échantillons de GBR (orange : granulats de béton récupéré ; bleu : granulats de béton recyclé)

V. MISE AU POINT D'UN ESSAI SIMPLIFIÉ DE DÉTERMINATION DE LA TENEUR EN SULFATES SOLUBLES DANS L'EAU DANS LES GRANULATS

Pour les granulats recyclés, les sulfates solubles dans l'eau sont habituellement dosés suivant la méthode de la norme NF EN 1744-1, paragraphe 10.2. Cependant, cette méthode n'est pas adaptée à une réalisation rapide en usine. Afin de permettre aux industriels une vérification rapide des granulats au moment de leur réception en usine, une méthode simplifiée a été étudiée. Pour ces essais, le kit Visicolor®, déjà étudié dans le cadre de travaux visant l'utilisation des GBR en technique routière (Paulus, 2016), a été retenu.

A. Principe du kit Visicolor®

Tout d'abord, les sulfates sont extraits suivant la méthode proposée par la norme NF EN 1744-1. Les sulfates sont ensuite dosés à l'aide du kit par une méthode colorimétrique. L'éprouvette du kit est remplie de solution à analyser. Une dizaine de gouttes d'un premier réactif (acide chlorhydrique) sont ajoutées à la solution puis une cuiller du second réactif (chlorure de baryum). La solution est mélangée et devient alors plus ou moins trouble, selon sa concentration en ion sulfate. À l'aide d'une pipette, la solution à analyser est ajoutée progressivement dans l'éprouvette graduée du kit Visicolor® jusqu'à que la croix noire au fond de l'éprouvette graduée ne soit plus visible à l'œil nu par l'opérateur (voir figure 8).

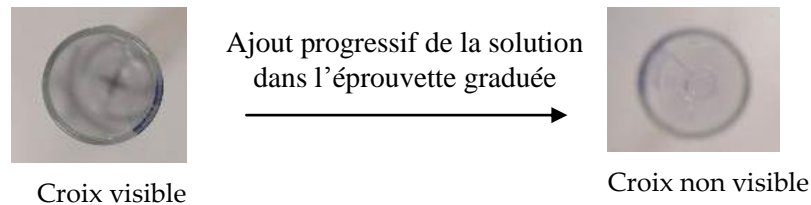


FIGURE 8. Ajout de la solution dans la cuve jusqu'à disparition de la croix

La lecture de la concentration en mg/L se fait directement sur l'éprouvette, à hauteur du niveau d'eau. Elle est convertie en pourcentage massique de la prise d'essai de granulats secs.

La fiabilité de la méthode a été testée, d'une part en testant le kit Visicolor® sur des solutions dont la teneur en sulfates était connue, et d'autre part en comparant les teneurs en sulfates mesurées sur des GBR par le kit Visicolor® avec celles obtenues par la méthode normalisée.

B. Vérification de la fiabilité de la méthode sur des solutions dont la teneur en sulfates est connue

Cinq solutions étalons ont été préparées à différentes teneur en sulfates (25, 50, 60, 70 et 90 mg/L) par dissolution de sulfate de calcium. Leur teneur en sulfates a ensuite été vérifiée à l'aide du kit Visicolor®. Le graphique de la figure 9 présente la concentration en ion sulfate mesurée avec le kit en fonction de la concentration réelle des solutions étalon.

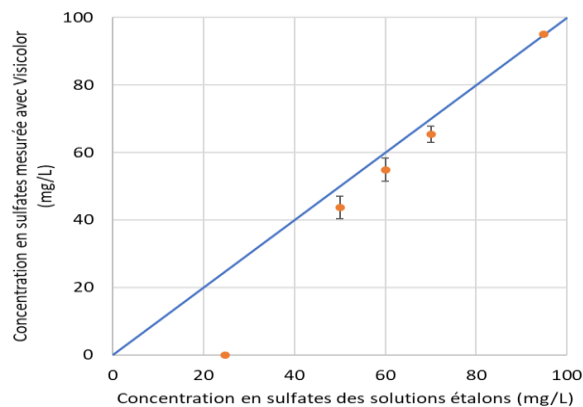


FIGURE 9. Concentration en ion sulfate mesurée avec le kit en fonction de la concentration réelle des solutions étalon

Pour la solution à 25 mg/L (ce qui correspondrait à une teneur en sulfates dans des granulats de 0,10 %), le kit ne détecte pas la présence de sulfate. Pour les solutions à 50, 60 et 70 mg/L (ce qui correspondrait respectivement à des teneurs en sulfates dans des granulats de 0,20 %, 0,24 % et 0,28 %), la teneur en sulfates est sous-estimée d'environ 7 %. Pour la solution à 90 mg/L (ce qui correspondrait à une teneur en sulfates dans des granulats de 0,36 %), la valeur obtenue par le kit correspond à la valeur réelle de la solution.

Ainsi, le kit permet de détecter les sulfates pour une teneur dans les granulats supérieure à 0,2 %. Il fournit une légère sous-évaluation de la teneur en sulfates, pour des teneurs supérieures à 0,2 %.

C. Comparaison des résultats avec ceux obtenus suivant la méthode de la norme NF EN 1744-1

La teneur en sulfates solubles dans l'eau a ensuite été déterminée sur des granulats de bétons recyclé et récupéré suivant les deux méthodes. Les résultats sont présentés sur le graphique de la figure 10.

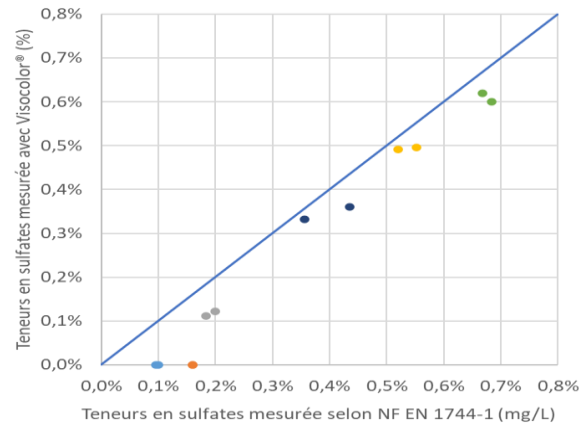


FIGURE 10. Teneurs en sulfates mesurées avec le Visocolor® en fonction des teneurs mesurées suivant la méthode de la norme NF EN 1744-1

Ces résultats confirment les tendances observées dans le paragraphe précédent. Pour des teneurs en sulfates inférieures à 0,2 %, les sulfates ne sont pas détectés par le kit. Au-delà, la teneur en sulfates est sous-estimée. La sous-estimation semble se réduire avec l'augmentation de la teneur en sulfates. Néanmoins, même pour des teneurs en sulfates proches de 0,7 %, la valeur reste légèrement sous-estimée.

D. Commentaires

Le kit Visocolor® permet d'estimer la teneur en sulfates lorsque celle-ci est supérieure à 0,2 %. La valeur obtenue avec le kit est légèrement inférieure à la valeur réelle. D'après les expériences menées au Cerib, le résultat varie peu suivant l'opérateur qualifié.

Cette méthode peut permettre un contrôle rapide en usine de la teneur en sulfates dans les granulats. L'absence de détection en-dessous de 0,2 % n'est pas problématique dans ce cas étant donné qu'il a été montré, qu'en-dessous de cette valeur, la présence de sulfates n'est pas préjudiciable. Des mesures de contrôle par la méthode normalisée devraient cependant être réalisées régulièrement.

VI. CONCLUSION

Des essais d'incorporation de granulats recyclés et granulats récupérés (GBR) dans des blocs de maçonnerie en béton produits en laboratoire et en usine pour les besoins de l'étude ont été menés. L'emploi de GBR en substitution des granulats naturels courants (sans autre modification de la formulation ou du process) tend à réduire la résistance mécanique des blocs. Néanmoins, l'ampleur de cette diminution est très variable suivant la nature des GBR. Pour l'un des GBR testé, aucun effet sur la résistance mécanique n'a été constaté pour des taux d'incorporation jusqu'à 30 %.

Un travail d'optimisation des formules (compacité granulaire) et du process de vibro-compactage pourraient aboutir à une amélioration de certains résultats.

Les essais de gonflement ont mis en évidence l'apparition d'un gonflement sulfatique du béton pour des teneurs en sulfates dans les granulats de 0,7 % et 1,2 % (teneur en sulfates de la totalité des granulats de la formule). Aucun gonflement n'est détecté sur les éprouvettes de référence ni sur les éprouvettes contenant les granulats pollués à 0,3 % de sulfates.

Ces résultats valident la possibilité d'intégrer des GBR dans les formules de blocs, sous réserve entre autres d'une teneur en sulfates inférieure à 0,2 % par rapport à l'ensemble des granulats de la formule. Ils ont permis l'évolution du référentiel de certification de la marque NF Blocs de Maçonnerie qui intègre désormais la possibilité d'incorporer des GBR (teneur en sulfates des GBR limitée à 0,7 % et teneur en sulfates sur l'ensemble des granulats entrant dans la composition du béton limitée à 0,2 %)

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les industriels ayant participé à l'étude et à la relecture de cet article : D. Bausson (EDYCEM), A. Brizou (ALKERN), T. Bernede (SEAC), I. Frigout (CELTYS), A. Gouré (EDYCEM), S. Guerouali (POINT P), A. Sabatier (FABEMI).

REFERENCES

- Ademe. (2020). Déchets – Chiffres-clés.
- F. de Larrad, H. Colina. (2018). Le béton recyclé. Ouvrages Scientifiques, OSI4. ISBN 978-2-85782-747-4.
- FIB. (2020). Economie et gestion.
- P.Pimienta, T. Tran, P. Delmotte, E. Vimond, M. Colombard-Prout. (1996). Emploi des granulats recyclés pour la fabrication de blocs de construction. *Journées techniques de l'Ademe, Sophia-Antipolis, 3 et 4 octobre 1996.*
- S. Orsetti. (1997). Influence des sulfates sur l'apparition et le développement de pathologies dans les matériaux de génie civil traités ou non aux liants hydrauliques – Cas du plâtre dans les granulats issus de produits de démolition. Thèse de doctorat de l'Université Paris VI.
- P. Rougeau, L. Schmitt, J. Mai-Nhu, A. Djerbi, M. Saillio, E. Ghorbel, J.-M. Mechling, D. Bulteel, M. Cyr, A. Lecomte, N. Leklou, R. Trauchessec, I. Moulin, T. Lenormand, O. Amiri. (2018). Propriétés liées à la durabilité/ Dans : de Larrard F. et Colina H. (Dir.), Le béton recyclé. Marne-la-Vallée : Ifsttar, (2018). Ouvrages Scientifiques, OSI4. ISBN 978-2-85782-747-4.
- H. Paulus, M. Jagueneau, R. Lafon, O. Waterblez. (2016). Dosage rapide sur site des sulfates dans les granulats recyclés issus du BTP. *Déchets Sciences et Techniques N° 71.* <https://doi:10.4267/dechets-sciences-techniques.3401>