
Absorption d'eau des poudres issues de recyclé : modèle et vérification

Mohamed ElKarim Bouarroudj^{1, 2*}, Sébastien Rémond¹, Adèle Grellier^{1, 2}, David Bulteel¹,
Luc Courard²

¹ *IMT Lille Douai, Univ. Lille, EA4515-LGCgE-Laboratoire de Génie Civil et géoEnvironnement, Département Génie Civil and Environnemental, F-59000 Lille, France*

² *Urban and Environment Research Unit, ArGEnCo Department, GeMMe Building Materials, University of Liège, Liège, Belgium*

RÉSUMÉ. *Dans notre recherche, une nouvelle approche a été élaborée à fin d'estimer l'absorption d'eau par les poudres supposées poreuses. Cette approche est basée sur un modèle théorique. Grâce à la distribution de la taille des pores obtenus avec la porosité au mercure réalisée sur le matériau en monolithe (matériau avant broyage) et la granulométrie de la poudre, le modèle théorique permet de calculer la porosité de la poudre. La validation du modèle théorique a été réalisée grâce à une simulation numérique. Cette simulation numérique permet d'expérimenter une simulation du broyage d'un matériau. Les résultats de porosité après broyage entre le modèle théorique et la simulation numérique étaient identiques. Par la suite, une vérification expérimentale sur une pâte du ciment broyée et une brique broyée (matériaux absorbant) a été réalisée.*

ABSTRACT. *In this research a new approach is investigated to have knowledge about the water absorption of porous powder. This approach is based on theoretical model. Due to the pore size distribution and particle size distribution in the monolith, the theoretical model can compute the remaining porosity of the material after grinding procedure. This theoretical model has been validated with a numerical model first. This numerical model allows to make a simulation of the grinding procedure. The numerical simulation gives the same result as the result obtained with the theoretical model. After that, hard cement past and brick have been used in order to validate the fact that porous powder can absorb water.*

MOTS-CLÉS: *Absorption d'eau, porosité, modélisation, granulométrie.*

KEY WORDS: *Water absorption, porosity, modelling, particle size distribution*

1. Introduction

Sachant que l'industrie cimentaire est responsable d'environ 5 % des émissions de gaz à effet de serre [KAJ 16], une partie significative de ces émissions peut toutefois être réduite en substituant une quantité du clinker par des additions minérales qui sont essentiellement des déchets inertes ou des coproduits industriels [HAB 09] [HAB 08].

Les bétons de démolition sont considérés comme des déchets inertes. Leur nature varie selon leur origine (bâtiment, ouvrages d'art constitués de bétons armés ou non armés et des structures routières). Les bétons de démolition peuvent être concassés pour être valorisés sous forme de granulats dans la fabrication de nouveaux bétons. Les fractions sables et plus encore les fractions fines sont nettement plus difficiles à valoriser que les fractions grossières. Ce travail vise essentiellement à trouver une piste de valorisation pour la fraction très fine (inférieure à 125 μ m).

Diliberto et al. [DIL 17] ont montré qu'il était possible d'utiliser les fines de recyclage dans la fabrication du ciment. Oksri-Nelfia et al. [OKS 16] ont étudié l'influence de la substitution du ciment par un sable recyclé et broyé. Les résultats ont montré que le sable recyclé et broyé donnait des caractéristiques similaires à celles d'un filler calcaire. Bordy et al. [BOR 17] ont réalisé des substitutions du ciment avec une pâte de ciment finement broyée dans le but d'étudier les phases anhydres toujours présentes. Ils ont réalisé une étude comparative à un ciment. Ils ont trouvé qu'il restait des phases anhydres dans la pâte et ont conclu que ces phases anhydres n'influencent pas la résistance mécanique. De même, ils ont montré qu'il était possible d'utiliser la pâte du ciment finement broyée comme addition minérale. Dans les recherches d'Oksri-Nelfia et al. [OKS 16] et Bordy et al. [BOR 17] il a été considéré que les matériaux recyclés initialement poreux ne l'étaient plus après broyage

Zhao et al. [7] ont démontré que la mesure d'absorption d'eau suivant la norme EN 1097-6 ou suivant la méthode IFSTTAR n'était pas applicable pour les particules de dimension inférieure à 0,5mm. A ce jour et à notre connaissance, il n'existe pas de méthode qui permet de mesurer d'une manière précise l'absorption d'eau pour les particules fines. Le but de cette recherche est d'estimer l'absorption d'eau à partir d'un modèle théorique. Ce modèle théorique utilise en données d'entrée la distribution granulométrique de la poudre et la distribution porosimétrique du monolithe (matériau avant broyage), et ainsi on peut estimer la porosité après broyage du matériau.

2. Présentation du modèle théorique et validation numérique

2.1 Présentation du modèle théorique

Un milieu poreux est composé de pores qui sont séparés par une matrice solide. On peut distinguer deux types de pores : des pores connectés et des pores non connectés. Pour quantifier le nombre de pores restant après le broyage d'un matériau initialement poreux, un modèle a été élaboré. Pour la présentation de ce modèle, les hypothèses suivantes sont mises en place :

- Milieu poreux infini, homogène et isotrope de porosité
- Pores sphériques non connectés de distributions et de diamètres donnés. Les pores sont « individualisables » de dimension caractéristique « 2 r » et de volume caractéristique « V_{cp} »
- Après le concassage, les grains sont considérés comme des sphères de dimension caractéristique « 2 R ». Les pores coupés lors du concassage sont considérés ouverts.
- La densité des centres des pores peut être calculée comme suit ou V_{cp} signifie le volume de centre de pore et N_c nombre de centre de pore:

$$\dots\dots\dots[1]$$

- dV>>V_{cp} signifie que le volume sur lequel on calcule la porosité (dV) est très grand devant le volume du centre de pore, mais cela ne signifie pas qu'il s'agit d'un unique volume, il peut s'agir du volume cumulé d'un très grand nombre de petits grains.

Le volume de porosité restant (V_p) dans une particule de rayon R correspond à la porosité de tous les pores dont les centres sont situés à une distance du centre du grain inférieure à R-r. On exclut donc tous les pores qui sont coupés par la surface du grain. Donc, le volume de porosité restant est calculé à partir du volume élémentaire de pore dV_p dans un volume dV (volume ou on calcule la porosité).

$$\dots\dots\dots[2]$$

Donc la porosité restante dans le grain de rayon R vaut

$$\dots\dots\dots[3]$$

Pour calculer la porosité restante pour toutes les tailles de pore, l'équation [3] doit être multipliée par la fraction volumique de chaque taille de pore x_i : V_R=φ × ∑_{i=0}ⁿ x_i × (1 - (-ⁱ - (-ⁱ) + (-ⁱ)).....[4]

Pour calculer la porosité restante pour toute la poudre, il faut prendre en considération toute les tailles des pores et grains, ainsi l'équation [4] doit être multipliée par la fraction volumique de chaque taille de grains y_j :

$$V_R=\phi \dots\dots\dots[5]$$

2.2 Validation numérique du modèle théorique

Afin de valider le modèle théorique d'une manière numérique, une simulation a été effectuée. Cette simulation a été réalisée suivant deux étapes :

- La première étape consiste à générer aléatoirement un nombre de sphères non sécantes dans un volume de calcul cubique en utilisant des conditions périodiques. Les sphères représentent ici les pores.
- La seconde étape consiste à diviser le volume de calcul en sphères représentant les grains issus du concassage, un pore est supposé ouvert, c'est-à-dire qu'il n'absorbe plus d'eau s'il est coupé. A la fin, la porosité du grain est calculée comme la proportion du volume des pores restants sur le volume total du grain.

Deux types de simulations ont été réalisés, la première simulation consiste à générer aléatoirement des particules sphériques de rayon R dans le volume de calcul poreux avec une seule taille de pore r . Dans cette première série de simulations, le ratio r/R varie entre 0,1 et 0,8. L'objectif de cette série est de valider l'équation [3]. La deuxième série de simulations consiste à générer aléatoirement des particules sphériques de rayon R dans le volume de calcul poreux avec [3] différentes tailles de pores r_1 , r_2 et r_3 . L'objectif de cette série est de valider l'équation [4]. Les détails du calcul réalisés sont présentés dans le tableau -1-.

Tableau 1 : Simulations numériques réalisées dans le but de valider les équations [3] et [4]

	Porosité initiale	Porosité finale	Nombre de particule	r/R	Nombre de pores
Validation [3]	30%	0,2%	10000000	0,8	572958
	30%	1,2%	10000000	0,66	572958
	30%	3,8%	10000000	0,5	572958
	30%	6,5%	61115	0,4	572958
	30%	15,4%	7639	0,2	572958
	30%	21,9%	955	0,1	572958
	30%	25,7%	120	0,05	572958
	30%	27,9%	15	0,025	572958
Validation [3]	30%	15,8%	1000	0,1, 0,2, 0,3	221932
	30%	22,0%	120	0,05, 0,1, 0,15	221932
	30%	25,8%	20	0,025, 0,05, 0,075	221932
	30%	27,2%	10	0,016, 0,033, 0,05	221932

La figure -1- présente la comparaison entre le calcul de porosité restante avec le modèle théorique en utilisant l'équation [3] et la simulation numérique. La figure 4 présente la comparaison entre le calcul de porosité restante avec l'équation [4] et la simulation numérique. Dans les deux simulations, parfaite corrélation entre les deux calculs est obtenu. Ainsi le modèle théorique est validé numériquement pour un matériau poreux composé de pores sphériques.

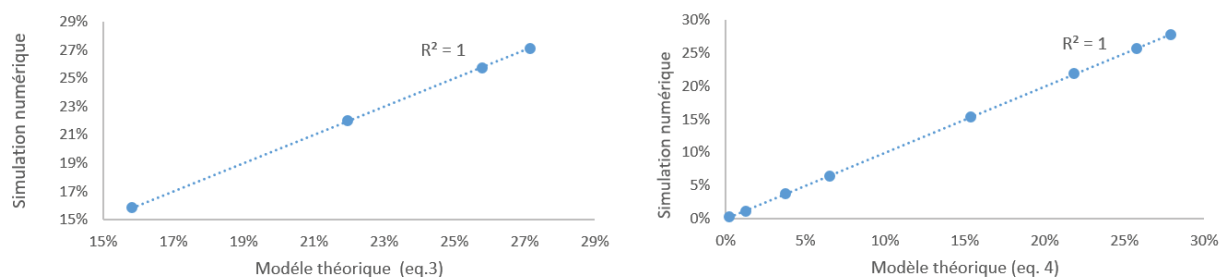


Figure 1 : Comparaison entre le modèle théorique ([3] et [4]) et simulation numérique.

3. Vérification de l'absorption d'eau des poudres recyclées

3.1 Matériaux de l'étude

Le ciment utilisé dans cette étude est un CEM I 52.5N conforme à la norme EN 197-1 de la société CBR, la masse volumique de ce ciment est de 3.1g/cm^3 et sa surface spécifique Blaine est de $3800\text{cm}^2/\text{g}$. Les fillers calcaires sont issus de la société Carmeuse, la masse volumique absolue est de 2.71g/cm^3 mesurée au pycnomètre à hélium, leur surface spécifique est de $3100\text{cm}^2/\text{g}$.

La pâte de ciment a été réalisée avec un rapport E/C=0,5. Pour éviter la ségrégation et le ressuage, la pâte est versée dans des bidons de 1 litre. Chaque bidon est mis en rotation pendant 6 heures, jusqu'à la fin de prise du ciment. Ensuite, la pâte de ciment durci est stockée sous eau pendant 90 jours pour arriver à un degré d'hydratation élevé. Après les 90 jours, la pâte de ciment est concassée, puis séchée à 40°C jusqu'à masse constante, la température de 40°C a été choisie pour éviter la détérioration des hydrates. Par la suite, la pâte de ciment a été broyée jusqu'à arriver à une granulométrie comparable au filler calcaire. La brique utilisée dans cette étude est issue de l'entreprise Ploegsteert en Belgique, elle a été broyée suivant la même procédure que la pâte de ciment. Des essais de porosité au mercure et d'absorption d'eau (pour obtenir la porosité à l'eau) ont été réalisés sur du monolithe (matériau avant broyage) pour la pâte de ciment et la brique. La granulométrie laser a été réalisée sur la pâte de ciment broyée et la brique broyée. Ces deux résultats ont permis de calculer avec l'équation [5] la porosité après broyage et ainsi calculer l'absorption d'eau des poudres après broyage. L'absorption d'eau des briques et de la pâte de ciment avant broyage est respectivement 13% et 30%. Après broyage, en appliquant le modèle on obtient 6% et 27.5%.

3.2 Plan expérimental

Bendimerad et al. [BEN 15] ont développé une méthode avec un pycnomètre pour mesurer l'absorption d'eau des granulats de béton recyclé de dimensions supérieures à 4mm. Cette méthode a été appliquée pour les particules fines inférieures à 125µm (brique et pâte de ciment broyée)

Ce test a été réalisé suivant les étapes suivantes :

- L'échantillon est tout d'abord séché jusqu'à masse constante.
- L'eau distillée est tout d'abord dégazée sous vide pendant 15 minutes
- La poudre est rajoutée dans le pycnomètre qui est rempli à moitié avec de l'eau distillée dégazée et mis sous agitation
- Par la suite, le pycnomètre est rempli jusqu'au trait puis le tout est mis sous vide.

Le test a été réalisé dans une pièce conditionnée à 20°C et le remplissage du pycnomètre ne dure pas plus d'une minute. Ce test ne peut être considéré comme un essai d'absorption d'eau car on n'effectue pas de mesure pendant la première minute. Après 10 minutes et 24 heures d'attente, si le niveau d'eau baisse par rapport au niveau du trait, une quantité d'eau est rajoutée. Cette quantité d'eau ($M_{ajoutée}$) correspond à la quantité d'eau absorbée par la poudre, et l'absorption d'eau est calculée avec l'équation- 6-. Le test a été réalisé sur la pâte de ciment broyée, sur la brique broyée, ainsi que sur le filler calcaire -3- fois pour assurer une bonne répétabilité.

$$WA= \text{---} \dots\dots\dots [6]$$

3.3 Résultats

Au cours du test, une quantité très importante de bulles a été observée. Ces bulles d'air sont dues à l'air qui reste piégé quand la poudre est introduite dans l'eau mais aussi à cause de l'absorption d'eau. La quantité de bulles était beaucoup plus importante pour la pâte de ciment broyée que pour la brique broyée. Le test sur le filler calcaire a été réalisé dans le but de voir si la diminution de la quantité d'eau initiale est due à ce phénomène. Le résultat a montré que le niveau d'eau n'a pas bougé, donc la diminution de la quantité d'eau n'est pas due à ce phénomène-là.

Les résultats du test obtenu après 10 minutes et 24 heures pour la pâte de ciment était de 8,8%, pour la brique de 2,2% et pour le filler calcaire 0%. Des résultats obtenus, on remarque que la pâte de ciment broyée et la brique broyée ont absorbé de l'eau, ainsi on confirme qu'une poudre même après broyage absorbe toujours de l'eau. On remarque qu'on obtient une différence très importante entre l'absorption d'eau estimé avec le modèle et l'absorption d'eau obtenu avec cette méthode. Aussi, on remarque qu'il n'y a pas de différence entre le test réalisé après 10 minutes et 24 heures, cela est sûrement dû au fait que l'absorption d'eau se fait très vite. Ainsi, on ne peut mesurer la bonne absorption d'eau, d'où tout l'intérêt du modèle théorique.

4. Conclusion

Dans ce travail, une méthode originale a été développée dans le but d'estimer l'absorption d'eau d'une poudre poreuse. Cette méthode est basée sur un modèle théorique basé, à son tour, sur la distribution de la taille des pores obtenus dans un monolithe et la distribution de la taille des grains après broyage de ce monolithe. La taille des pores influence significativement la porosité restante après broyage ainsi que l'absorption d'eau de la poudre.

Grâce à l'essai au pycnomètre, il a été prouvé expérimentalement que la poudre absorbe de l'eau même après broyage. Il a été aussi démontré que la poudre avait une capacité d'absorption d'eau très rapide.

References

- [BEN 15] A. Z. Bendimerad, E. Roziere, and A. Loukili, "Combined experimental methods to assess absorption rate of natural and recycled aggregates," *Mater. Struct. Constr.*, vol. 48, no. 11, pp. 3557–3569, 2015.
- [BOR 17] A. Bordy, A. Younsi, S. Aggoun, and B. Fiorio, "Cement substitution by a recycled cement paste fine: Role of the residual anhydrous clinker," *Constr. Build. Mater.*, vol. 132, pp. 1–8, 2017.
- [DIL 17] C. Diliberto, A. Lecomte, J.-M. Mechling, L. Izoret, and A. Smith, "Valorisation of recycled concrete sands in cement raw meal for cement production," *Mater. Struct.*, vol. 50, no. 2, p. 127, 2017.
- [HAB 08] G. Habert and N. Roussel, "Comment concevoir un béton ayant un faible impact environnemental ?," *XXVIèmes Rencontres Univ. Génie Civ. AUGC 2008, Jun 2008, Fr.*, 2008.
- [HAB 09] G. Habert and N. Roussel, "Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 6, pp. 397–402, 2009.
- [KAJ 16] R. Kajaste and M. Hurme, "Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost," *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 4041–4052, 2016.
- [OKS 16] L. Oksri-Nelfia, P. Mahieux, O. Amiri, P. Turcry, and J. Lux, "Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials," *Mater. Struct.*, vol. 49, no. 8, pp. 3239–3251, 2016.
- [ZHA 13] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, and W. Xu, "Influence of hardened cement paste content on the water absorption of fine recycled concrete aggregates," *J. Sustain. Cem. Mater.*, vol. 2, no. 3–4, pp. 186–203, 2013.