

Projet de recherche et développement



Stockage de CO₂ par carbonatation du béton recyclé

RAPPORT DE RECHERCHE / LIVRABLE

Caractérisation expérimentale du mortier des « GBR modèles »

Auteur(s) / Organisme(s) :

Bruno Huet (LafargeHolcim)
Philippe Turcry (LaSIE, La Rochelle Université, CNRS)
Thomas Pernin, Jonathan Mai-Nhu (Cerib)

Thème de rattachement :

GT1.2 : Modélisation du phénomène de carbonatation accélérée

Numéro de rapport (à établir par l'IREX) :

N° lettres de commande :

CERIB : LC-x-FCARB-033

LafargeHolcim : LC-x-FCARB-032

LaSIE : LC-20-FCARB-031

Date : 30 janvier 2023

Site internet : www.fastcarb.fr

Plateforme collaborative : www.omnispace.fr/fastcarb

Président : Raoul de PARISOT

Directeur : Jean-Michel TORRENTI

Gestion administrative et financière : IREX (www.irex.asso.fr), 9 rue de Berri 75008 PARIS, contact@irex.asso.fr

Sommaire

SOMMAIRE	2
1 RÉSUMÉ	3
1.1 EN FRANÇAIS	3
1.2 EN ANGLAIS	3
2 INTRODUCTION	4
3 MATÉRIAUX ET MÉTHODES	5
3.1 MATÉRIAUX	5
3.2 MÉTHODES DE CARACTÉRISATION.....	5
3.2.1 Porosité	5
3.2.2 Composition minéralogique	6
3.2.3 Isotherme de désorption de vapeur d'eau	7
3.2.4 Coefficient de diffusion gazeuse	8
4 RÉSULTATS	10
4.1 POROSITÉ	10
4.2 COMPOSITION MINÉRALOGIQUE	10
4.3 ISOTHERME	12
4.4 COEFFICIENT DE DIFFUSION GAZEUSE	14
5 SYNTHÈSE	16
6 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	17
7 ANNEXES	18

1 Résumé

1.1 En français

Des granulats « modèles » de géométrie sphérique ont été fabriqués au cours du PN Fastcarb à partir d'un mortier contenant un ciment Portland et un sable siliceux. Ces granulats ont été testés en carbonatation accélérée par le groupe de travail GT1.1 au cours d'une campagne d'essais croisés. En parallèle, le GT1.2 a simulé la carbonatation de ces sphères de mortier avec différents modèles développés par les membres du groupe de travail. Au préalable, le mortier a été caractérisé dans le but d'obtenir des données d'entrée des modèles. Ce rapport présente les résultats de la campagne de caractérisation du mortier. Les propriétés déterminées sont les suivantes : la porosité accessible à l'eau, la masse volumique, le degré d'hydratation du ciment, les teneurs initiales en portlandite, CSH et CaCO_3 , le coefficient de diffusion du O_2 gazeux, l'isotherme de désorption de la vapeur d'eau à 20°C. Des essais de suivi de masse en conditions données ont également été réalisés pour permettre aux modélisateurs de déterminer les propriétés de transfert hydrique.

1.2 En anglais

Model aggregates of spherical geometry were produced during the National Project Fastcarb from a mortar containing Portland cement and silica sand. These spherical aggregates were tested using accelerated carbonation by the working group WG1.1 during a round-robin testing campaign. In parallel, the WG1.2 simulated the carbonation of these mortar spheres with different models developed by the working group members. Beforehand, the mortar was characterized in order to obtain input data for the models. This report presents the results of the mortar characterization campaign. The determined properties are the following: the porosity accessible to water, the density, the hydration degree of the cement, the initial contents of portlandite, CSH and CaCO_3 , the diffusion coefficient of gaseous O_2 , the water vapor desorption isotherm at 20°C. Mass monitoring tests under given conditions were also performed to allow the WG1.2 partners to determine the water transfer properties.

2 Introduction

Des granulats de géométrie sphérique ont été fabriqués au cours du PN Fastcarb à partir d'un mortier contenant un ciment Portland et un sable siliceux. La fabrication de ces granulats « modèles » est décrite dans le rapport FCARB/R/008. Les granulats ont été testés en carbonatation accélérée par le groupe de travail GT1.1 au cours d'une campagne d'essais croisés. En parallèle, le GT1.2 a simulé la carbonatation des sphères de mortier avec différents modèles développés par les membres du groupe de travail (action 1.2.3b).

Au préalable, le mortier a été caractérisé dans le but d'obtenir des données d'entrée pour les simulations (action 1.2.3a). Ce rapport présente les résultats de la campagne de caractérisation du mortier.

Les échantillons testés (prismes 4x4x16cm et sphères) ont été envoyés en deux lots, l'un au CERIB et l'autre au LaSIE. Le CERIB a déterminé les propriétés suivantes :

- porosité accessible à l'eau et masse volumique,
- degré d'hydratation du ciment,
- teneurs en portlandite et CaCO_3 .

Le CERIB a également réalisé un suivi de masse d'échantillons soumis à un séchage dans des conditions données. Ces données doivent permettre aux modélisateurs de déterminer des propriétés de transfert hydrique du mortier

Le LaSIE a déterminé les propriétés suivantes :

- porosité accessible à l'eau et masse volumique,
- teneurs en portlandite et en CaCO_3 (ATG),
- isotherme de désorption de la vapeur d'eau à 20°C.

Des échantillons préparés au LaSIE ont été envoyés au laboratoire HIC (Holcim Innovation Center) pour une détermination du coefficient de diffusion du O_2 gazeux du mortier dans différents états hydriques.

Le rapport présente les matériaux et méthodes puis les résultats de la campagne de caractérisation.

3 Matériaux et méthodes

3.1 Matériaux

Le mortier étudié a été fabriqué à partir du ciment CEM I 52,5 N CP2 de l'usine Saint Pierre La Cour de masse volumique de 3,12 g/cm³ et d'un sable normalisé de masse volumique de 2,64 g/cm³. Le Tableau 1 donne la composition chimique et minéralogique d'un ciment CEM I 52,5 N de la même usine, d'après une fiche technique datant de 2012 (nous supposons que la composition du ciment n'a pas évolué depuis).

Tableau 1. Composition chimique et minéralogique du ciment.

Major oxides (mass %)					Clinker mineralogical composition (mass %)			
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
20,4	5,0	2,7	65,2	1,0	71	9	8	9

La composition du mortier est donnée dans le Tableau 2. La fraction volumique de pâte est d'environ 50% et le rapport massique E/C de 0,5.

Tableau 2. Composition du mortier (kg par m³).

Sable	1350
Ciment	624
Eau	312

Le mortier a été fabriqué à l'IUT GCCD de Strasbourg par des étudiants encadrés par le Laboratoire ICube (Braymand, 2021). Des éprouvettes 4x4x16 cm et des billes de diamètre 1, 1,5 et 4 cm ont été coulées au cours de travaux pratiques. Après décoffrage, les éprouvettes ont été conservées en conditions endogènes pendant au moins 28 jours jusqu'à envoi au CERIB et au LaSIE. Les éprouvettes ont servi à la caractérisation du mortier grâce aux protocoles décrits dans la suite. Les disques ayant servi aux essais de diffusion gazeuse au HIC ont été obtenus au LaSIE par sciage des billes de 4 cm de diamètre.

3.2 Méthodes de caractérisation

3.2.1 Porosité

La porosité accessible à l'eau et la masse volumique ont été déterminées selon le protocole décrit dans la norme NF P 18-459. Des échantillons (billes ou éprouvettes 4x4x16 cm) ont d'abord été saturés en eau sous vide pendant 48 heures pour obtenir leur masse à l'état saturé (m_{air}). Les échantillons ont ensuite subi une pesée hydrostatique permettant la détermination de leur masse sous l'eau (m_{eau}) et de leur volume apparent grâce à la masse volumique de

l'eau (ρ_{eau}). Les échantillons ont enfin été étuvés à 105°C jusqu'à masse constante définie par une variation de masse inférieure à 0,05% sur 24 heures. La masse du mortier sec (m_{sec}) permet le calcul du volume de vides saturés en eau. Les propriétés sont calculées comme suit.

- **Masse volumique du matériau sec (kg/m^3) :**

$$\rho_d = \frac{m_{\text{sec}}}{m_{\text{air}} - m_{\text{eau}}} \times \rho_{\text{eau}}$$

- **Masse volumique du matériau saturé en eau (kg/m^3) :**

$$\rho_{\text{sat}} = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{air}} - m_{\text{eau}}} \times \rho_{\text{eau}}$$

- **Porosité accessible à l'eau (%) :**

$$\varphi = \frac{m_{\text{air}} - m_{\text{sec}}}{m_{\text{air}} - m_{\text{eau}}} \times 100$$

3.2.2 Composition minéralogique

La composition minéralogique a été déterminée par Analyse Thermogravimétrique (ATG), qui consiste à enregistrer en continu les variations de masse d'un échantillon soumis à une rampe de température, allant de la température ambiante à 1150°C. Cet essai permet de quantifier les espèces qui, pour différentes plages de températures, perdent soit leur eau sous forme de vapeur (hydrates), soit leur CO_2 sous forme gazeuse (carbonates de calcium). Des mesures de flux de chaleur peuvent également être réalisées pendant l'essai (analyse ATD). La décomposition des phases minérales peut se faire de manière endothermique.

Selon la littérature, la déshydroxylation de la portlandite se situe entre 400 et 550°C. La plage de décomposition est déterminée de manière plus précise grâce à la DTG (dérivée de la courbe de la perte de masse en fonction de la température).

La plage de décarbonatation des CaCO_3 peut s'étendre de 580 à 1000°C, plus communément exploitée de 600 à 900°C. Cette large plage correspond au polymorphisme des carbonates de calcium (calcite, vatérite et aragonite) qui se traduit par des différences de stabilité thermique. La calcite est l'espèce la plus stable et se dégrade avec un pic de DTG autour de 800°C. Aragonite et vatérite, formes de carbonate de calcium moins stables thermodynamiquement, se décomposent à plus basses températures, pouvant décaler le pic résultant. La calcite résulte principalement de la carbonatation de la portlandite, alors que la vatérite et l'aragonite résulte de la carbonatation des C-S-H, des phases alumineuses et sulfatées, selon (Morandeau, 2014).

Des analyses ont été menées sur le mortier étudié après un étuvage à 105°C jusqu'à masse constante. Après broyage du mortier ainsi séché, des échantillons de masse entre 50 et

150 mg ont été testés en ATG/ATD sous atmosphère inerte obtenu par flux d'argon avec une vitesse de chauffe de 10°C/min.

3.2.3 Isotherme de désorption de vapeur d'eau

Les isothermes de désorption de vapeur d'eau ont été estimées à l'aide de la méthode dite des solutions salines (Baroghel-Bouny, 2007). Des billes de mortier de diamètre et de morceaux d'éprouvettes 4x4x16 cm ont été concassés pour obtenir un sable entre 0 et 3 mm. La fraction supérieure à 1 mm a été récupérée après tamisage. Le matériau 1/3 mm ainsi obtenu a été saturé en eau sous vide selon le protocole de la norme NF P 18-459. Des échantillons entre 1 et 1,5 g ont ensuite été placés sur des coupelles en verre installées dans des dessiccateurs, dont l'humidité relative est contrôlée par des solutions salines de NaCl et de MgNO₃ (Figure 1). Ces solutions salines permettent l'obtention d'humidités respectivement de 75,5% et 53,5%.



Figure 1. Vue des dessiccateurs utilisés pour la détermination des isothermes (Gendron, 2019).

Avant la mise en ambiance, l'eau en surface des échantillons après saturation sous vide a été absorbée par un papier filtre. La masse des échantillons sur coupelle a été déterminée de manière régulière sur 4 mois. Le suivi a été arrêté à l'issue de cette période en raison de l'absence de variation de masse des échantillons sur 7 jours (variation inférieure à 0,05%). Après cette mise à l'équilibre hydrique, les échantillons ont été étuvés à 60°C jusqu'à masse constante puis à 105°C également jusqu'à masse constante. La masse est considérée constante en l'absence de variation relative de plus de 0,05% sur 24 heures. Les masses obtenues à 60°C et 105°C ont permis le calcul de teneurs en eau définies par rapport à la masse du matériau sec à 60°C ou à 105°C.

3.2.4 Coefficient de diffusion gazeuse

Le coefficient de diffusion gazeuse a été déterminé à l'aide du dispositif développé au cours de la thèse de Boumaaza (Boumaaza, 2020). Les essais ont été réalisés au HIC sur des disques d'épaisseur d'environ 3 mm et de diamètre d'environ 40 mm. Au cours d'un essai, le disque testé est placé dans la cellule de diffusion, montrée sur la Figure 2, serré entre 2 joints.

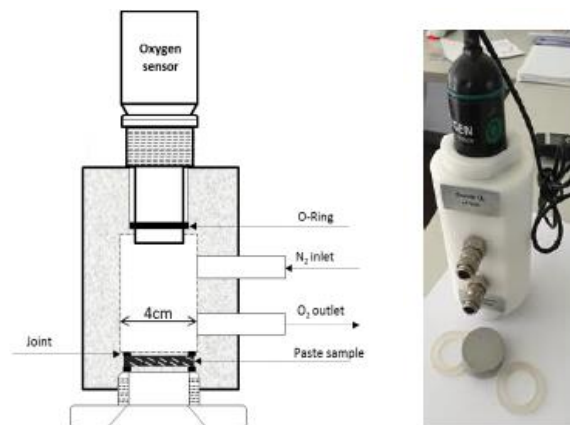


Figure 2. Dispositif de diffusion gazeuse, vu en coupe à gauche, et photographié avec un échantillon et deux joints, à droite (Boumaaza et al, 2018).

Une face du disque est en contact avec l'air ambiant à une concentration d'environ 20% de O_2 . L'autre face est en contact avec la chambre aval de la cellule qui est purgée de son dioxygène en début d'essai par un flux d'azote pendant environ 30 secondes. À la suite de cette purge, un gradient de O_2 est établi entre amont et aval et un flux diffusif de O_2 vient accroître progressivement la concentration de ce gaz dans la chambre en aval. L'essai consiste donc à déterminer l'évolution dans le temps de cette concentration. La courbe d'accumulation de O_2 est utilisée pour déterminer par analyse inverse le coefficient de diffusion effectif du O_2 grâce à la Seconde loi de Fick.

Au cours de cette campagne expérimentale, les disques de mortier ont été mis à l'équilibre hydrique dans trois ambiances différentes (3%, 55% et 93% HR) avant les essais de diffusion.

3.2.5 Suivi de masse au cours d'un séchage en ambiance contrôlée

Des prismes 4x4x16 cm ont été sciées au CERIB pour obtenir des 8 éprouvettes parallélépipédiques de surface 2x4 cm et d'épaisseur entre 1 et 2 cm (Figure 3). Les quatre faces latérales des éprouvettes ont été étanchéifiées laissant à l'air libre les faces opposées 2x4 cm.

Les éprouvettes ont été placées dans des dessiccateurs à 20°C et 65% HR (humidité relative contrôlée par une solution saturée en nitrate d'ammonium). Un suivi de masse de chaque

épreuve a été réalisée sur 250 jours. La perte de masse ainsi déterminée doit permettre de déterminer les propriétés de transfert hydrique du mortier, comme la perméabilité à l'eau.



Figure 3. Éprouvettes de mortier soumises pendant 4 mois à un séchage en conditions contrôlées.

4 Résultats

4.1 Porosité

Le Tableau 3 donne les résultats des deux laboratoires ayant participé à la campagne de mesures. Le mortier étudié a une porosité d'environ 23%.

Tableau 3. Porosité accessible à l'eau et masses volumiques.

Laboratoire	Géométrie de l'échantillon	Nom de l'échantillon	Porosité φ (%)	Masse volumique ρ_{sat} (g/cm ³)	Masse volumique ρ_d (g/cm ³)
CERIB	Découpé d'un prisme 4x4x16	A3	22,0	2,27	2,05
		A4	22,7	2,26	2,04
		A7	23,2	2,26	2,02
		B3	22,8	2,27	2,04
		B4	22,8	2,26	2,04
	Bille 40 mm	R	22,0	2,25	2,03
LaSIE	Bille 40 mm	B40	20,1	2,28	2,07
	Bille 20 mm	B20	23,0	2,34	2,11
	Bille 15 mm	B15	24,8	2,44	2,19
		Moyenne	22,6	2,29	2,07
		Ecart type	1,3	0,06	0,05

4.2 Composition minéralogique

Des analyses minéralogiques par ATD/TG ont été menées au CERIB et au LaSIE sur le mortier d'étude après une phase de séchage à 105°C. La Figure 4 donne des exemples de traitement des courbes TG et DTG pour la détermination des teneurs en portlandite et carbonate de calcium. Dans cet exemple, la présence de pics endothermiques et de variation massiques est associée à des changements d'état cristallin ou à la déshydratation de certains hydrates de la pâte de ciment :

- de 100 à 150°C : Le large pic est attribué au départ de l'eau de constitution des hydrates C-S-H et ettringite (Persy and Deloye, 1986) ;
- de 430 à 530°C : La perte de masse de 1,99% autour de 485°C correspond à la déshydroxylation de la Portlandite. Cela indique une proportion de portlandite de 8,3% en masse dans le mortier ;
- de 620 à 790°C : On observe une perte moyenne de CO₂ de l'ordre 1,45 % en masse dans la plage des carbonates, avec un pic atteint à 735°C. Cela témoigne d'une teneur en CaCO₃ initiale d'environ 3,3% en masse.

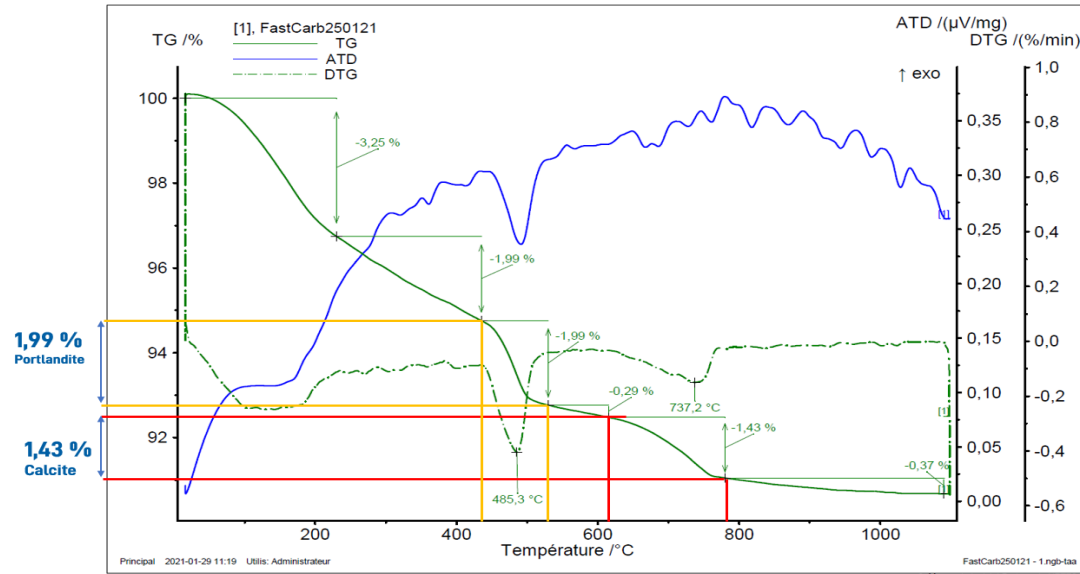


Figure 4. Analyses thermo-différentielles (ATD) et thermogravimétriques (DTG et TG) sur des échantillons de mortier (CERIB).

Le Tableau 4 donne les teneurs en portlandite et en carbonate de calcium exprimées par rapport à la masse des échantillons séchés à 105°C.

Tableau 4. Teneurs massiques en Portlandite et carbonate de calcium déterminées par ATD/TG.

Laboratoire	Echantillon	Eau liée (%)	Ca(OH) ₂ (%)	CaCO ₃ (%)
CERIB	1		8,3	3,3
	2		8,2	3,3
LaSIE	1	5,5	7,3	3,6
	2	5,0	6,7	3,2
	Moyenne	5,25	7,6	3,3
	Ecart type	-	0,7	0,2

Le degré d'hydratation du ciment du mortier a été évalué à partir de la teneur en eau liée déterminée par ATG :

$$\alpha = \frac{E \cdot \rho_d}{X \cdot C} \tag{Equation 1}$$

Avec : E la teneur en eau liée (% massique), ρ_d la masse volumique apparente (kg/m³), X une valeur caractéristique traduisant la quantité d'eau théorique pour l'hydratation complète du ciment (déterminée à partir de la composition du ciment), C la teneur en ciment (kg/m³).

Avec une teneur en eau liée de 5,25% en masse et une valeur de X pour les ciments CEM I de 23,5%, on obtient ainsi un degré d'hydratation de 0,73.

A partir de la teneur massique en portlandite (7,6%) et de la masse volumique du matériau étuvé à 105°C (Tableau 3 : $\rho_d = 2066 \text{ kg/m}^3$), on en déduit sa teneur volumique de 157 kg/m^3 soit une concentration de 2122 mol/m^3 de mortier.

En supposant que pour 1 mole de portlandite produit un ciment portland produit 0,8 mole de CSH (de composition $\text{C}_{3,4}\text{S}_2\text{H}_x$), on obtient une estimation de la concentration en CSH de 1698 mol/m^3 .

4.3 Isotherme de désorption de la vapeur d'eau

La teneur en eau du mortier a été déterminée à l'équilibre hydrique, selon le critère proposé en section 3.2.3, à 20°C et à deux humidités relatives, 55 et 75% HR. La teneur en eau à 100% HR est supposée égale à la teneur en eau après saturation sous vide.

Les teneurs en eau sont calculées comme suit :

$$w = 100 \cdot \frac{m_{\text{HR}} - m_s}{m_s} \quad \text{Équation 2}$$

Avec : m_{HR} la masse de l'échantillon à l'équilibre à l'humidité relative donnée et m_s la masse de l'échantillon sec.

La masse m_s a été déterminée à deux températures : 60°C et 105°C. La Figure 5 donne les isothermes ainsi obtenues pour ces deux états secs de référence.

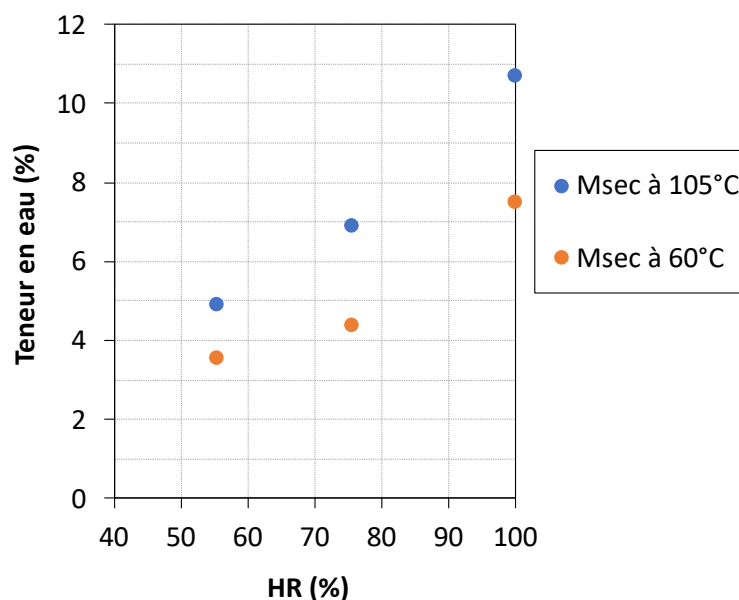


Figure 5. Isothermes de désorption de vapeur d'eau du mortier à 20°C avec les teneurs en eau calculées comme le rapport de la masse du matériau à l'équilibre à HR et de la masse du matériau étuvé à 105°C ou étuvé à 60°C.

A partir des teneurs obtenues avec la masse de référence à 105°C, les paramètres du modèle d'isotherme de Van Genuchten (Équation 3) ont été obtenus :

$$S = \left(1 + \left(\frac{P(HR)}{P_0} \right)^{\frac{1}{1-m}} \right)^{-m} \tag{Equation 3}$$

Avec : S le degré de saturation en eau, P(HR) la pression capillaire (fonction de HR selon la loi de Kelvin-Laplace), P₀ et m des constantes.

La Figure 6 compare le modèle de Van Genuchten et les données expérimentales.

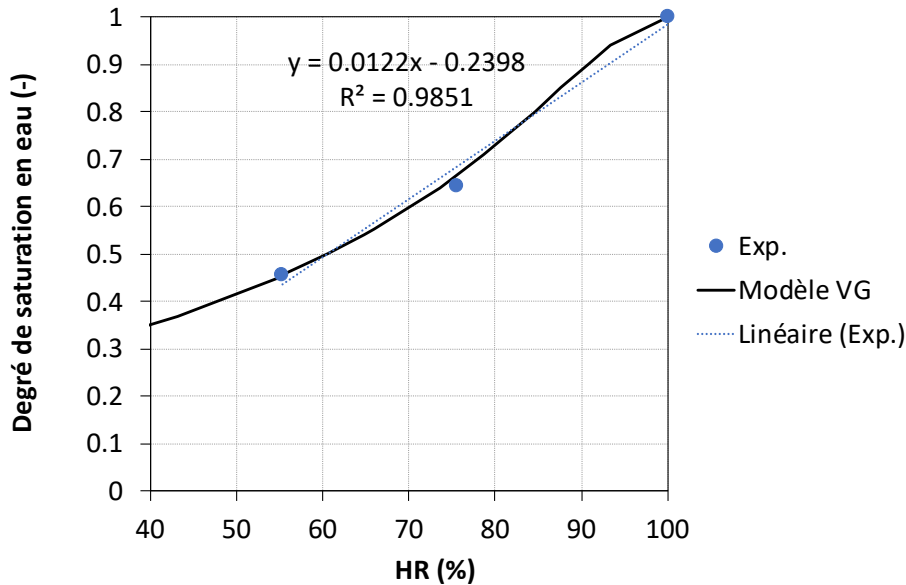


Figure 6. Isotherme de désorption de vapeur d'eau du mortier à 20°C : modèle de Van Genuchten (VG) calé sur les données expérimentales (Exp.) et régression linéaire sur ces mêmes données.

4.4 Cinétique de séchage à 65% HR

Le suivi du séchage d'éprouvettes de mortier a été réalisé à 20°C et 65% HR. La Figure 7 montre les courbes de pertes de masse pour les 8 éprouvettes dont les dimensions sont données dans le Tableau 5. L'équilibre hydrique ne semble pas encore atteint après 250 jours de séchage.

Les données pour chaque éprouvette sont fournies en annexe (perte de masse en % et perte de masse en kg/m²).

Tableau 5. Dimensions des éprouvettes exposées au séchage à 20°C et 65% HR. Le séchage se fait en 1D selon l'épaisseur, par les deux surfaces de dimensions longueur x largeur. La surface donnée dans le tableau correspond à la somme des deux surfaces exposées.

	A3		A4		A7		B4	
	1	2	1	2	1	2	1	2
Longueur (mm)	40,8	40,4	39,3	39,6	40,6	40,6	41,1	41,1
Largeur (mm)	20,6	18,8	20,5	18,8	20,7	18,5	19,7	19,0
Epaisseur (mm)	13,3	12,2	12,4	13,0	13,4	13,4	17,9	18,5
Surface totale exposée (mm ²)	1680,1	1519,6	1613,3	1491,0	1679,2	1503,6	1619,0	1558,8

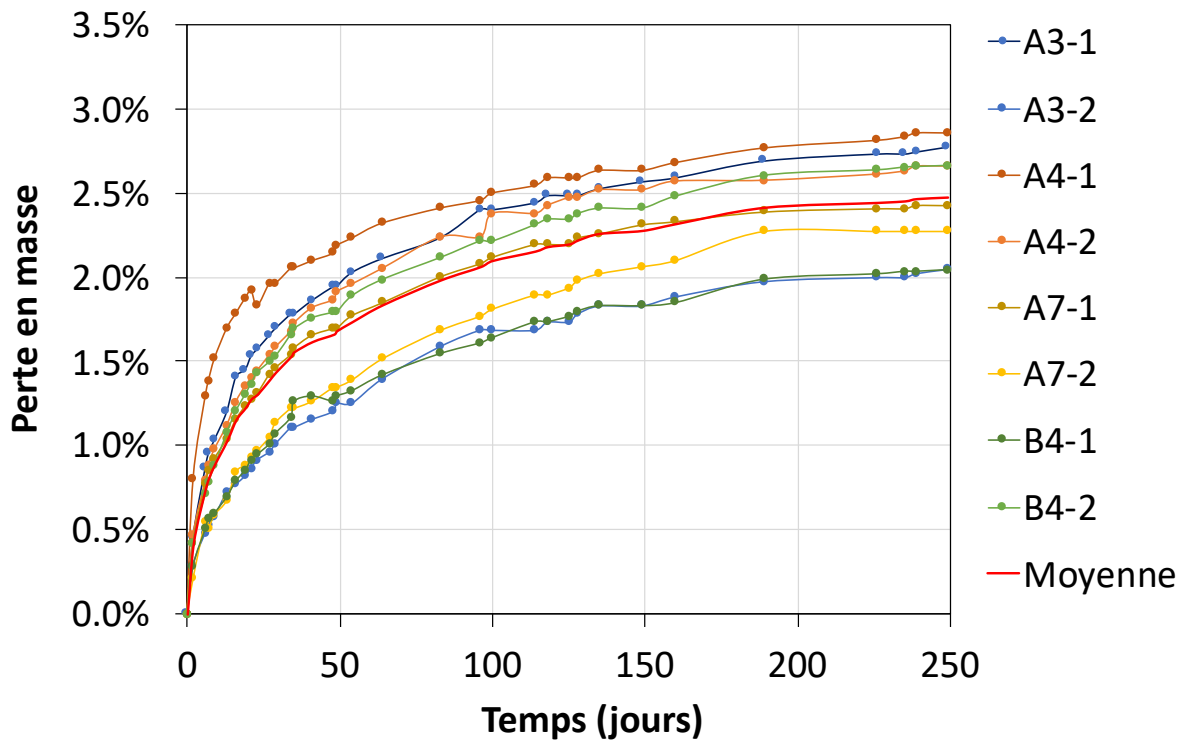


Figure 7. Pertes de masse des échantillons de mortier soumis à un séchage à 65% HR et 20°C.

4.5 Coefficient de diffusion gazeuse

Le coefficient de diffusion a été déterminée au HIC par des essais de diffusion au dioxygène sur des 21 disques mis à l'équilibre à 3 humidités : 3,55 et 93% (7 disques par HR).

La Figure 8 montre les coefficients de chaque disque et le Tableau 6 donne les valeurs moyennes à chaque humidité relative.

Tableau 6. Coefficients de diffusion du dioxygène (D_{O_2}) à 20°C du mortier mis à l'équilibre à trois humidités relative (HR)

HR (%)	D_{O_2} (m ² /s)
	Moyenne (coefficient de variation)
93	$2,5 \cdot 10^{-9}$ ($\pm 62\%$)
55	$2,9 \cdot 10^{-9}$ ($\pm 21\%$)
3	$2,8 \cdot 10^{-8}$ ($\pm 22\%$)

On note une forte dispersion des résultats pour l'humidité relative de 93% ce qui traduit sans doute une absence d'homogénéité des échantillons en terme de teneur en eau.

On note également la faible différence entre le coefficient de diffusion moyen à 55% HR et le coefficient moyen à 93% HR. Cette absence de différence marquée, alors que les degrés de saturation à ces deux HR sont bien différents (Figure 5), suggère que les disques séchés à 55% HR n'étaient sans doute pas à l'équilibre hydrique avant essai de diffusion.

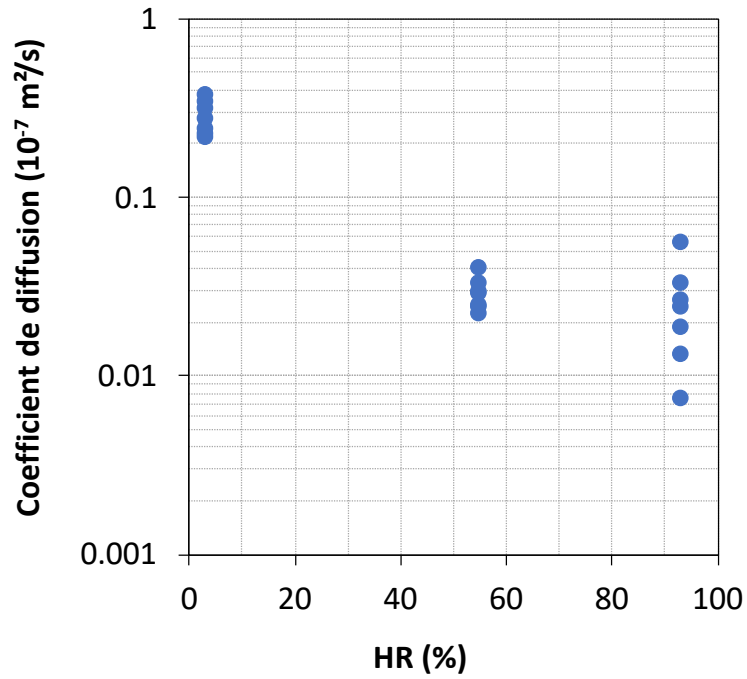


Figure 8. Coefficients de diffusion de 21 disques de mortier mis à l'équilibre à différentes humidités relatives.

5 Synthèse

Les essais de caractérisation du mortier fournissent les données d'entrée des modèles utilisés dans l'action 1.2.3b pour simuler la carbonatation accélérée des billes de mortier.

Le Tableau 7 récapitule la plupart des données ainsi obtenues.

Tableau 7. Propriétés du mortier.

Propriétés	Unités	Valeurs	Méthode
Porosité	%	22,6	mesures
MVsat	kg/m ³	2293	mesures
MVsec	kg/m ³	2066	mesures
Portlandite	mol/m ³	2122	mesures
CSH	mol/m ³	1698	estimation
Isotherme P ₀	MPa	27	Van Genuchten (calage)
Isotherme m	-	0,4	Van Genuchten (calage)
D _{O₂} (93% HR)	m ² /s	2,5.10 ⁻⁹ (± 62%)	mesures
D _{O₂} (55% HR)	m ² /s	2,9.10 ⁻⁹ (± 21%)	mesures
D _{O₂} (3% HR)	m ² /s	2,8.10 ⁻⁸ (± 22%)	mesures

6 Références bibliographiques

V. Baroghel-Bouny, Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials - Part I : Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure. Cement and Concrete Research, 37, 3, 414-437, 2007.

Gendron F (2019), « Carbonatation des matériaux cimentaires : étude de la diffusion du CO₂ », Thèse de doctorat de La Rochelle Université.

Boumaaza M (2020), « Étude expérimentale de la diffusivité du gaz et de la capacité de fixation de CO₂ des matériaux cimentaires », Thèse de doctorat de La Rochelle Université et de l'Université Technique de Munich.

M. Boumaaza, B. Huet, G. Pham, Ph Turcry, A. Aït-Mokhtar, C. Gehlen, A new test method to determine the gaseous oxygen diffusion coefficient of cement pastes as a function of hydration duration, microstructure, and relative humidity, Materials and structures, 2018, 51 (2), (10.1617/s11527-018-1178-z)

S. Braymand, Concassage des prismes du mortier de référence et des bétons fabriqués par le laboratoire I-Cube -Envoi des matériaux concassés et des sphères de mortier de référence fabriqués par le laboratoire I-Cube aux laboratoires partenaires, Rapport du PN Fastcarb (FCARB/R/008), Mai 2021.

A. Morandeau, « Carbonatation atmosphérique des systèmes cimentaires à faible teneur en portlandite », Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, 2014.

7 Annexes

Le tableau ci-dessous donne les pertes de masse relatives des prismes en cours de séchage à 20°C et 65% HR (protocole en section 3.2.5). Le tableau sur la page suivante donne les pertes de masse en kg par m² de surface exposée au séchage (totale des 2 faces opposées).

Jours	A3		A4		A7		B4		Moyenne
0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2	0,5%	0,3%	0,8%	0,5%	0,4%	0,2%	0,3%	0,4%	0,4%
6	0,9%	0,5%	1,3%	0,8%	0,8%	0,5%	0,5%	0,7%	0,7%
7	1,0%	0,5%	1,4%	0,9%	0,8%	0,5%	0,6%	0,8%	0,8%
9	1,0%	0,6%	1,5%	1,0%	0,9%	0,6%	0,6%	0,9%	0,9%
13	1,2%	0,7%	1,7%	1,1%	1,0%	0,7%	0,7%	1,1%	1,0%
16	1,4%	0,8%	1,8%	1,3%	1,2%	0,8%	0,8%	1,2%	1,2%
19	1,4%	0,8%	1,9%	1,4%	1,2%	0,9%	0,9%	1,3%	1,2%
21	1,5%	0,9%	1,9%	1,4%	1,3%	0,9%	0,9%	1,4%	1,3%
23	1,6%	0,9%	1,8%	1,4%	1,3%	1,0%	0,9%	1,4%	1,3%
27	1,7%	1,0%	2,0%	1,5%	1,4%	1,1%	1,0%	1,5%	1,4%
29	1,7%	1,0%	2,0%	1,6%	1,5%	1,1%	1,1%	1,5%	1,4%
34	1,8%	1,1%	2,1%	1,7%	1,5%	1,2%	1,2%	1,7%	1,5%
35	1,8%	1,1%	2,1%	1,7%	1,6%	1,2%	1,3%	1,7%	1,6%
41	1,9%	1,2%	2,1%	1,8%	1,7%	1,3%	1,3%	1,8%	1,6%
48	1,9%	1,2%	2,1%	1,9%	1,7%	1,3%	1,3%	1,8%	1,7%
49	1,9%	1,3%	2,2%	1,9%	1,7%	1,3%	1,3%	1,8%	1,7%
54	2,0%	1,3%	2,2%	2,0%	1,8%	1,4%	1,3%	1,9%	1,7%
64	2,1%	1,4%	2,3%	2,1%	1,8%	1,5%	1,4%	2,0%	1,8%
83	2,2%	1,6%	2,4%	2,2%	2,0%	1,7%	1,5%	2,1%	2,0%
96	2,4%	1,7%	2,5%	2,2%	2,1%	1,8%	1,6%	2,2%	2,1%
100	2,4%	1,7%	2,5%	2,4%	2,1%	1,8%	1,6%	2,2%	2,1%
114	2,4%	1,7%	2,5%	2,4%	2,2%	1,9%	1,7%	2,3%	2,1%
118	2,5%	1,7%	2,6%	2,4%	2,2%	1,9%	1,7%	2,3%	2,2%
125	2,5%	1,7%	2,6%	2,5%	2,2%	1,9%	1,8%	2,3%	2,2%
128	2,5%	1,8%	2,6%	2,5%	2,2%	2,0%	1,8%	2,4%	2,2%
135	2,5%	1,8%	2,6%	2,5%	2,3%	2,0%	1,8%	2,4%	2,3%
149	2,6%	1,8%	2,6%	2,5%	2,3%	2,1%	1,8%	2,4%	2,3%
160	2,6%	1,9%	2,7%	2,6%	2,3%	2,1%	1,8%	2,5%	2,3%
189	2,7%	2,0%	2,8%	2,6%	2,4%	2,3%	2,0%	2,6%	2,4%
226	2,7%	2,0%	2,8%	2,6%	2,4%	2,3%	2,0%	2,6%	2,4%
235	2,7%	2,0%	2,8%	2,6%	2,4%	2,3%	2,0%	2,7%	2,4%
239	2,7%	2,0%	2,9%	2,7%	2,4%	2,3%	2,0%	2,7%	2,5%
249	2,8%	2,0%	2,9%	2,7%	2,4%	2,3%	2,0%	2,7%	2,5%

Jours	A3		A4		A7		B4		Moy.
0	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0	0	0.00
2	0.07	0.04	0.11	0.07	0.07	0.03	0.06	0.08	0.07
6	0.12	0.07	0.18	0.11	0.12	0.09	0.10	0.14	0.12
7	0.14	0.07	0.19	0.13	0.13	0.08	0.11	0.15	0.13
9	0.15	0.08	0.21	0.14	0.14	0.09	0.12	0.17	0.14
13	0.17	0.10	0.24	0.16	0.16	0.11	0.14	0.21	0.16
16	0.20	0.11	0.25	0.18	0.18	0.13	0.15	0.24	0.18
19	0.21	0.11	0.26	0.19	0.19	0.14	0.17	0.26	0.19
21	0.22	0.12	0.27	0.20	0.20	0.15	0.18	0.27	0.20
23	0.23	0.13	0.25	0.21	0.20	0.15	0.19	0.28	0.20
27	0.24	0.13	0.27	0.22	0.22	0.17	0.20	0.30	0.22
29	0.24	0.14	0.27	0.23	0.23	0.18	0.21	0.30	0.23
34	0.26	0.15	0.29	0.24	0.24	0.19	0.23	0.33	0.24
35	0.26	0.15	0.29	0.25	0.24	0.19	0.25	0.33	0.24
41	0.27	0.16	0.29	0.26	0.26	0.20	0.25	0.35	0.25
48	0.28	0.16	0.30	0.27	0.26	0.21	0.25	0.35	0.26
49	0.28	0.17	0.30	0.27	0.26	0.21	0.25	0.35	0.26
54	0.29	0.17	0.31	0.28	0.27	0.22	0.26	0.37	0.27
64	0.30	0.19	0.32	0.30	0.29	0.24	0.28	0.39	0.29
83	0.32	0.22	0.33	0.32	0.31	0.27	0.30	0.42	0.31
96	0.35	0.23	0.34	0.32	0.32	0.28	0.32	0.44	0.32
100	0.35	0.23	0.35	0.34	0.33	0.29	0.32	0.44	0.33
114	0.35	0.23	0.35	0.34	0.34	0.30	0.34	0.46	0.34
118	0.36	0.24	0.36	0.35	0.34	0.30	0.34	0.46	0.34
125	0.36	0.24	0.36	0.36	0.34	0.31	0.35	0.46	0.35
128	0.36	0.24	0.36	0.36	0.35	0.31	0.35	0.47	0.35
135	0.36	0.25	0.37	0.36	0.35	0.32	0.36	0.47	0.36
149	0.37	0.25	0.37	0.36	0.36	0.33	0.36	0.47	0.36
160	0.37	0.26	0.37	0.37	0.36	0.33	0.36	0.49	0.36
189	0.39	0.27	0.38	0.37	0.37	0.36	0.39	0.51	0.38
226	0.39	0.27	0.39	0.38	0.37	0.36	0.40	0.52	0.38
235	0.39	0.27	0.39	0.38	0.37	0.36	0.40	0.52	0.39
239	0.39	0.28	0.40	0.38	0.38	0.36	0.40	0.52	0.39
249	0.40	0.28	0.40	0.38	0.38	0.36	0.40	0.52	0.39
Hauteur (mm)	13.3	12.2	12.4	13.0	13.4	13.4	17.9	18.5	