

ÉTUDE COMPARATIVE DE LA MIGRATION DES IONS CHLORURES DANS DES MORTIERS À MATRICE CIMENTAIRE ET ÉPOXYDE : INFLUENCE DU SABLE RECYCLÉ

A COMPARATIVE STUDY OF THE MIGRATION OF CHLORIDE IONS IN CEMENT-AND EPOXY BASED MORTARS: EFFECTS OF RECYCLED SAND

Amal BOURGUIBA^{1,2}, Elhem GHORBEL¹, Wadia DHAOU²

¹ Université de Cergy Pontoise, 5Mail Gay-Lussac, Neuville-sur-Oise, 95031, Cergy Pontoise Cedex

² Faculté des Sciences de Tunis, Université Tunis El Manar. Le Campus Universitaire, Tunis El Manar, 2092 Tunis, Tunisie

1. INTRODUCTION

La durabilité constitue l'une des préoccupations essentielles dans la conception, la réalisation ou l'entretien des ouvrages de génie civil. La corrosion des armatures est la principale cause de dégradation des structures en béton armé ; elle est aussi la plus importante en termes de coûts

de réparation. La pénétration d'agents agressifs dans le béton, notamment les ions chlorures, conduit à l'amorçage et au développement du processus de corrosion. Cette problématique présente un enjeu technologique et économique important et pousse les maîtres d'ouvrages à chercher des solutions rapides et efficaces pour prolonger la durée de vie de leurs ouvrages et optimiser les coûts de

maintenance et de réparation. Parmi les solutions possibles on peut citer le confinement des éléments dégradés par des mortiers spécifiques. Cette méthode nécessite la maîtrise de la mise en œuvre et l'étude de la durabilité de ces mortiers, mortiers modifiés par des polymères et mortiers à base d'un liant entièrement en polymère.

Ce travail porte plus particulièrement sur la deuxième catégorie de mortiers appelés mortiers de résine et désignés par MR. Le polymère est une époxyde durcie par une amine. Les mortiers MR ont été formulés en faisant varier le pourcentage de liant. L'utilisation de granulats issus de la déconstruction des bétons représente un véritable enjeu stratégique dans le développement durable. Ce qui a motivé l'étude sur la possibilité de valoriser les matériaux de déconstruction dans la fabrication des mortiers résineux et à substituer le sable normalisé par un autre sable recyclé.

Un diluant a été introduit dans la composition des mortiers MR dans le but d'améliorer leur mise en œuvre. A l'état durci les résistances mécaniques, la porosité accessible à l'eau et la durabilité vis-à-vis de la migration des ions chlorures ont été étudiées. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux du mortier hydraulique et l'influence de la substitution du sable normalisé par le sable recyclé a fait l'objet d'une étude détaillée.

Cette étude a été effectuée dans le cadre d'un projet CMCU PHC-Utique qui est une coopération interuniversitaire franco-tunisienne, financée par le ministère tunisien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique (MESRS), et en France par le Ministère français des Affaires étrangères et du Développement international (MAEDI). Cette coopération est structurée dans

le cadre du Partenariat Hubert Curien-Utique (PHC-Utique) sous forme de projets de recherche mixtes qui impliquent au moins une équipe tunisienne et une équipe française. Ce programme est géré par le Comité Mixte pour la Coopération Universitaire (CMCU) sous la responsabilité d'un Co-président français et d'un Co-président tunisien.

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

2.1. Matériaux

Le polymère utilisé pour l'élaboration des MR est un système époxy-amine (Eponal 371) fourni par BOSTIK (France). La résine ou pré-polymère est une époxyde constituée d'un diglycidyl éther de bisphénol A et le durcisseur est une amine aliphatique. Les deux composants sont mélangés avec un rapport massique de 100:60 (résine : durcisseur) selon les recommandations du fabricant.

Le diluant utilisé pour diminuer la viscosité du mélange résine/durcisseur et améliorer ainsi l'ouvrabilité du mortier MR est l'octanoate de méthyle (Aldrich). Des travaux antérieurs ont montré que le dosage optimal est de 5% de la masse totale du liant [BOU 14]. Deux types de sables ont été utilisés pour la formulation des mortiers MR et MC : un sable normalisé et un autre recyclé (fourni par le PN Recybeton). L'analyse granulométrique de ces charges minérales est représentée par la figure 1.

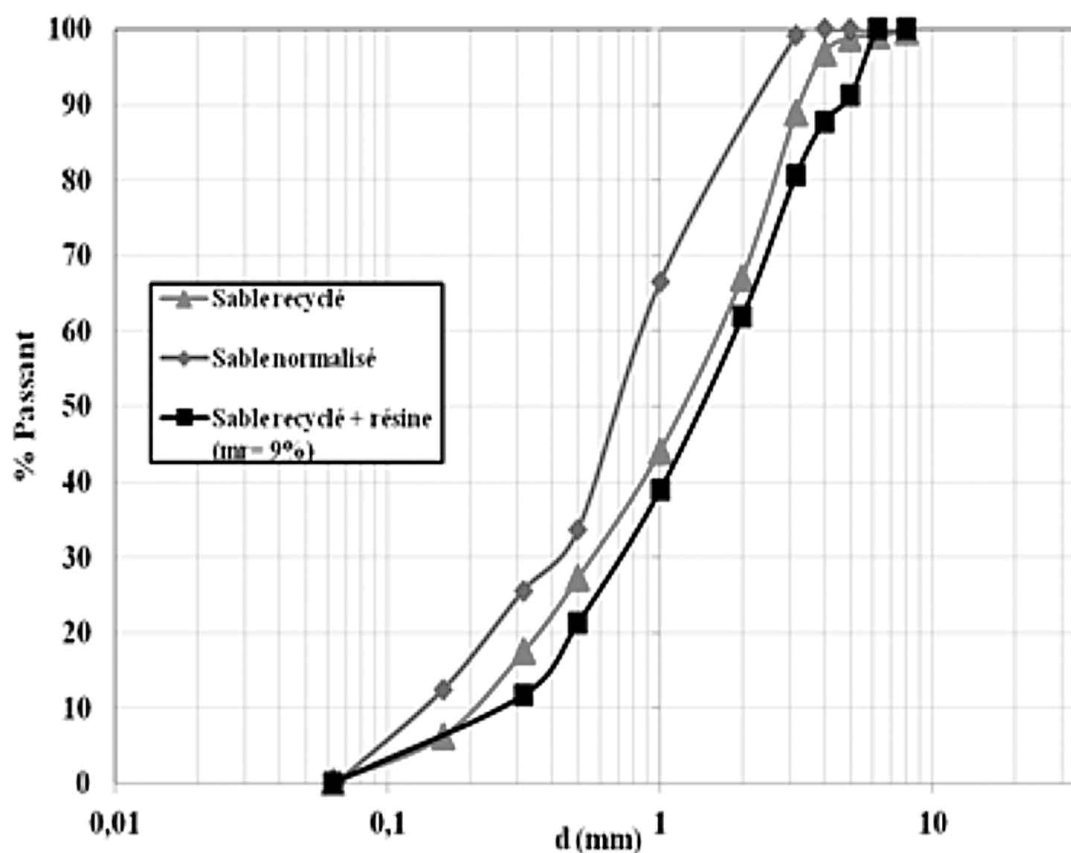


Figure 1 : Analyse granulométrique des sables normalisé et recyclé.

Différentes formulations de mortiers sont étudiées en faisant varier le pourcentage du liant base d'époxyde (9%, 12% et 20%) par rapport à la masse totale du mortier MR ainsi que le type de sable (Tableau 1).

Deux mortiers hydrauliques, MC, ont été élaborés : le premier normalisé fabriqué selon la norme NF EN 196-1 et le second, recyclé, dans le but de comparer sa résistance à la migration des ions chlorures avec celles des mortiers de résine (Tableau 2).

2.2. Méthodes expérimentales

2.2.1. Mesure de la porosité accessible à l'eau (NF P 18-459, [NF P 18-459, 10])

La porosité a été mesurée sur des éprouvettes cylindriques (110 mm de diamètre et 30 mm de hauteur) à l'âge de 28 jours. Chaque mesure est répétée trois fois. Cette mesure nécessite l'utilisation d'une étuve ventilée maintenue à une température de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, d'un appareillage à vide (dessiccateur + pompe) capable de maintenir la pression à une valeur inférieure ou égale à 25 mbar et d'une balance hydrostatique permettant une précision de 0,01% sur la masse du corps étudié. L'essai consiste à mettre l'échantillon sous vide durant 4h, à introduire progressive-

ment le liquide d'imbibition (pendant 15 min) et à maintenir cette pression réduite pendant 44 h. À la fin de cette étape, une pesée hydrostatique de l'échantillon est réalisée suivie d'une pesée dans l'air (masse saturée surfaces sèches). Pour déterminer la masse sèche, l'échantillon est conservé à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La valeur de la porosité est obtenue par la formule suivante :

$$P = \frac{M_{ss} - M_s}{M_{ss} - M_{eau}} \times 100 \quad [1]$$

où M_{ss} est la masse saturée surfaces sèches, M_s la masse sèche et M_{eau} la masse dans l'eau.

2.2.2. Diffusion des ions chlorures en régime non stationnaire (NT Build 492, [NTBuild192, 99])

L'étude de la migration des ions chlorures dans les mortiers de résine est réalisée sur des éprouvettes cylindriques (110 mm de diamètre et 50 mm d'épaisseur) à l'âge de 28 jours. L'essai consiste à mettre sous vide les échantillons de mortier dans un dessiccateur relié à une pompe, pendant 4h. Cet échantillon est ensuite saturé, sous vide, par NaOH (12g/L) pendant 44 h. Après saturation, les éprouvettes sont insérées dans des cellules de diffusion des ions chlorures. Ces cellules sont composées de deux com-

Mortier fabriqué avec 9% de polymère et du sable normalisé					
% Diluant	Diluant	Pré-polymère	Durcisseur	Sable	Masse volumique (Kg/m³)
0	0	138,5	83	2240	2462
5	11	137	82,4	2211	2441
Mortier fabriqué avec 12% de polymère et du sable normalisé					
% Diluant	Diluant	Pré-polymère	Durcisseur	Sable	Masse volumique (Kg/m³)
0	0	180,5	108	2118	2407
5	14,3	178,5	107	2081	2381
Mortier fabriqué avec 20% de polymère et du sable normalisé					
% Diluant	Diluant	Pré-polymère	Durcisseur	Sable	Masse volumique (Kg/m³)
0	0	284	170,4	1818	2272
5	22	279	167,5	1764	2233
Mortier fabriqué avec 20% de polymère et du sable recyclé					
% Diluant	Diluant	Pré-polymère	Durcisseur	Sable	Masse volumique (Kg/m³)
0	0	269	161,4	1721	2151
5	21	265	159	1673	2118

Tableau 1 : Les dosages des différentes formulations en Kg pour 1m³ de mortier de résine.

Type de MC	Dosage (Kg/m³)				Masse volumique (Kg/m³)
	Ciment	Eau	Sable	Super-plastifiant	
MC-sable recyclé	731	250	1418	5	2403
MC-sable normalisé	511	255	1532	–	2299

Tableau 2 : Dosage pour la fabrication de 1m³ de mortier cimentaire MC.

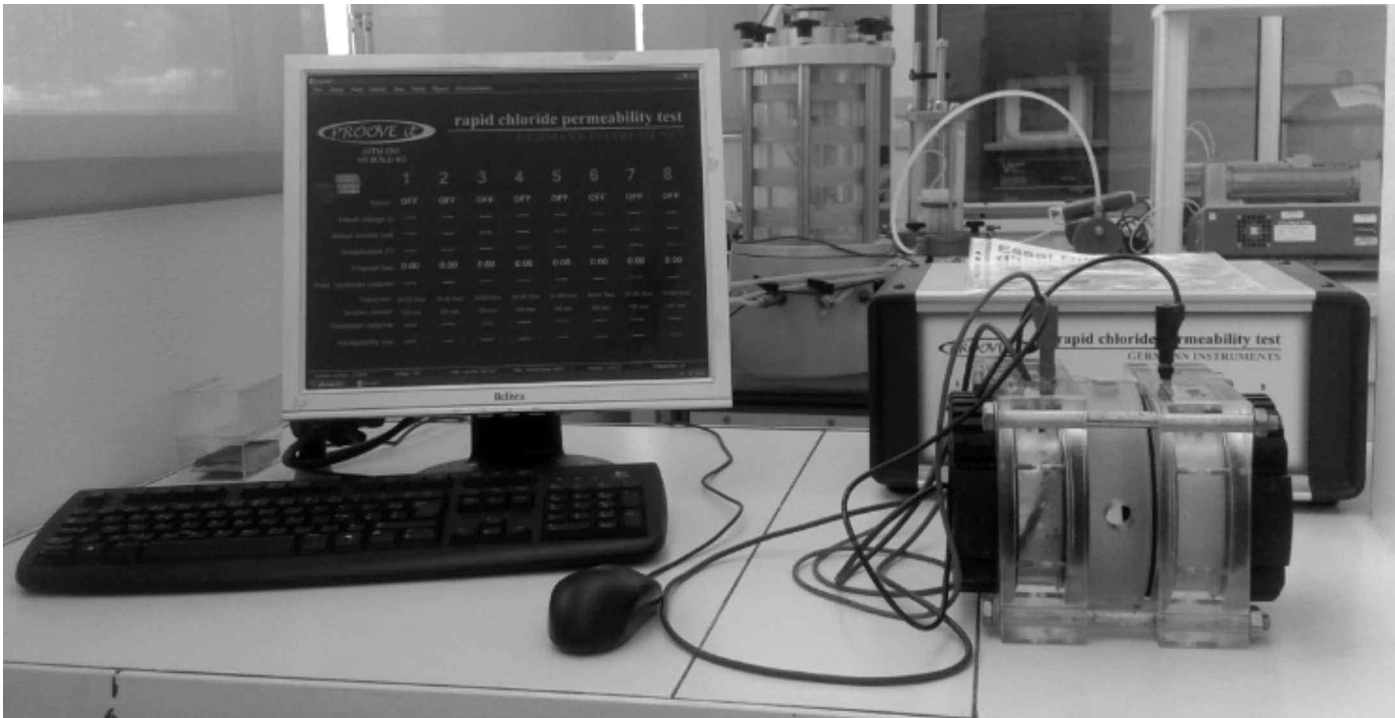


Figure 2 : Dispositif expérimental de la diffusion des ions chlorures.

partiments : le compartiment en amont, relié à l'anode, est rempli d'une solution de NaOH (12g/L) et le compartiment en aval, relié à la cathode, est rempli d'une solution de NaCl (112 g/L). L'attaque par les ions Cl^- se fait pendant 24h en imposant une différence de potentiel entre les deux électrodes. Ces ions migrent de la cathode vers l'anode. Le dispositif expérimental est représenté à la figure 2.

Par la suite, l'éprouvette est découpée en deux parties par fendage et aspergée de nitrate d'argent (0.1 M). La formation d'un dépôt blanc d'AgCl sur la surface de l'éprouvette permet de mesurer la distance $X_d(\text{mm})$ de la migration des ions chlorures à l'intérieur de l'échantillon (figure 3). Cette distance est utilisée pour calculer le coefficient de migration selon l'équation suivante :

$$D_{nssm} (10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}) = \frac{0,0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \quad [2]$$

$$\left(X_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T)LX_d}{U - 2}} \right)$$

où D_{nssm} désigne le coefficient « non-steady-state migration », U la valeur absolue de la tension appliquée, $T(^{\circ}\text{C})$ la valeur moyenne des températures initiale et finale de la solution anolyte, $L(\text{mm})$ l'épaisseur de l'échantillon, $X_d(\text{mm})$ la valeur moyenne des profondeurs de pénétration et $t(\text{h})$ la durée de l'essai.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

3.1. Ouvrabilité des mortiers de résine

L'ouvrabilité des mortiers a été étudiée en utilisant un mini cône ($D=100 \text{ mm}$, $d=70 \text{ mm}$, $h=50 \text{ mm}$) et une table de

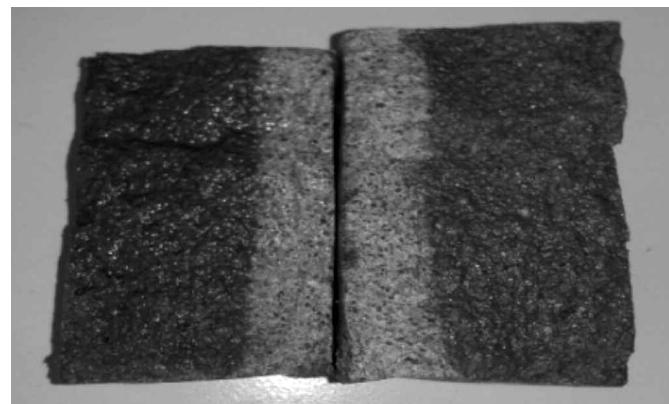


Figure 3 : Mortier hydraulique normalisé aspergé de nitrate d'argent après la migration des ions chlorures.

secousse. Le cône est placé au centre de la table ; il est ensuite rempli de mortier. Après 15 chocs, le moule tronconique est soulevé et l'affaissement du mortier est mesuré.

Différentes formulations ont été étudiées en faisant varier la fraction massique du polymère (m_p) par rapport à la masse totale du mortier ainsi que le type de sable. Les résultats obtenus sont présentés à la figure 4. Il est à noter que plus le pourcentage du polymère augmente plus l'affaissement des mortiers est important. Au-delà de 20%, un phénomène de ressuage est observé pour les MR élaborés avec sable normalisé. Pour les mortiers MR fabriqués avec du sable recyclé, le test d'ouvrabilité au cône n'a pu être réalisé que pour $m_p \geq 12\%$. En effet, en dessous de 12% on obtient un sable avec formation d'agglomérats sans aucune cohésion (figure 5). L'analyse de la granulométrie du mélange sable recyclé + époxyde (avec $m_p = 9\%$) est reportée sur la figure 2 où il apparaît que les deux sables recy-

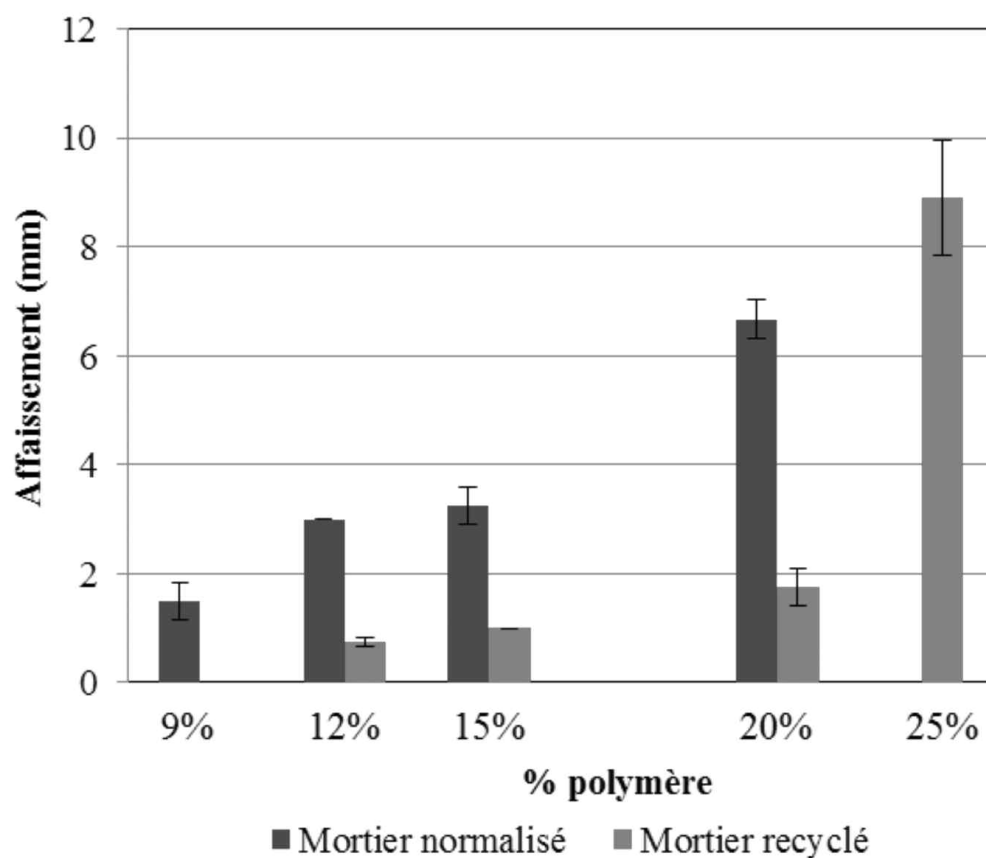


Figure 4 : Évolution de l'affaissement en fonction du pourcentage de polymère et du type de sable.

clés présentent des distributions granulaires proches. La mesure du coefficient d'absorption d'eau WA à 24 heures et celle de la porosité conformément à la norme EN 1097-6, montrent que l'ajout du polymère à de faibles taux a pour effet d'enrober les grains de sable recyclé ; donc sa porosité diminue ainsi que son coefficient d'absorption d'eau (tableau 3). Cela permet de conclure qu'une partie du polymère est absorbée et/ou adsorbée par les grains de sable recyclé ce qui génère une diminution de l'ouvrabilité. À partir de ces résultats il a été convenu d'élaborer les MR à sable normalisé avec des taux de polymère de 9%, 12% et 20% et les MR à sable recyclé avec 20% de polymère (tableau 1). Tous les résultats obtenus seront comparés avec ceux du mortier hydraulique normalisé et recyclé dont la composition est représentée dans le tableau 2. La composition a été établie de sorte à avoir la même ouvrabilité que le mortier hydraulique normalisé.

Type de sable	WA (%)	Porosité (%)
Sable normalisé	0,15	0,38
Sable recyclé	7,9	16,1
Sable recyclé + 9% polymère	3,44	7,76

Tableau 3 : Absorptions d'eau et porosités des différents types de sable.

L'octanoate de méthyle a été ajouté à la composition des mortiers de résine en vue d'améliorer l'ouvrabilité. Des études antérieures [BOU 14] ont conduit à opter pour un ajout de 5% par rapport à la masse totale du mortier.



Figure 5 : Sable recyclé + 9% polymère.

La figure 6 montre que l'ajout du diluant rend l'affaissement plus important. L'amélioration de l'ouvrabilité par l'introduction de l'octanoate de méthyle est très remarquable pour le mortier à sable normalisé formulé avec 20% de polymère. En effet, une facilité de mise en œuvre est observée lors de la fabrication des éprouvettes.

3.2. Porosité accessible à l'eau

Les propriétés de durabilité comme la résistance à la corrosion et à la diffusion des ions chlorures sont étroitement liées à la structure poreuse du matériau [BAG 97] ; la poro-

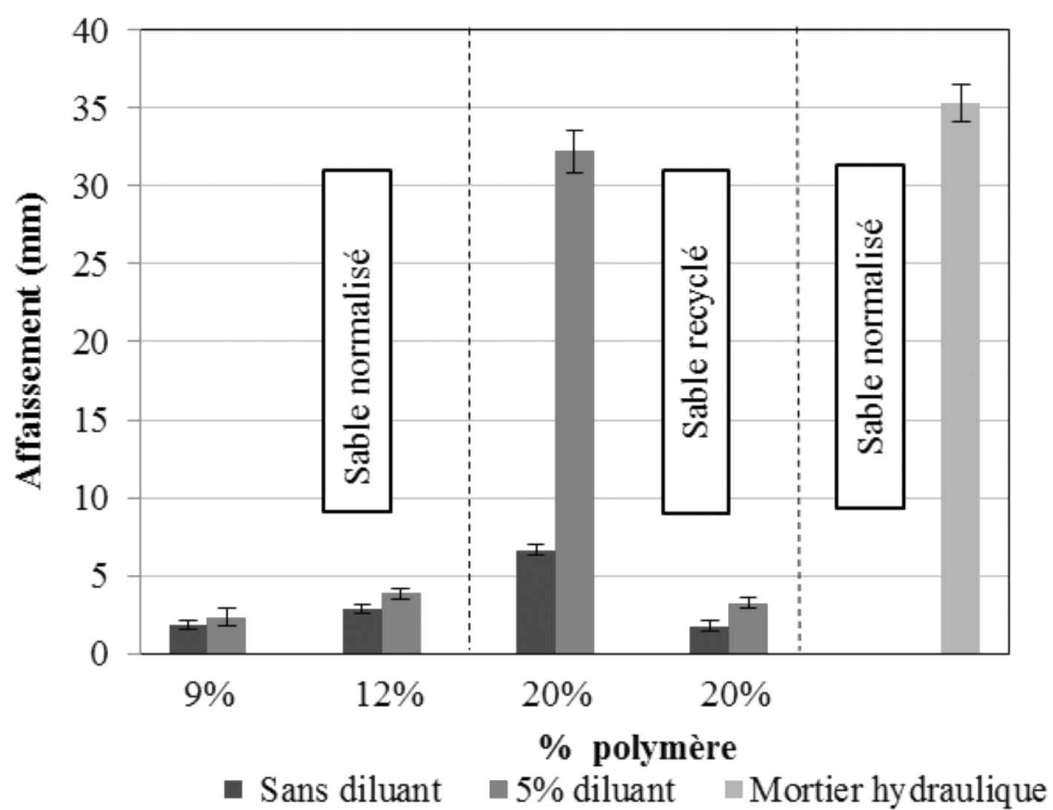


Figure 6 : Évolution de l'affaissement en fonction du pourcentage de polymère, du pourcentage du diluant et du type de sable.

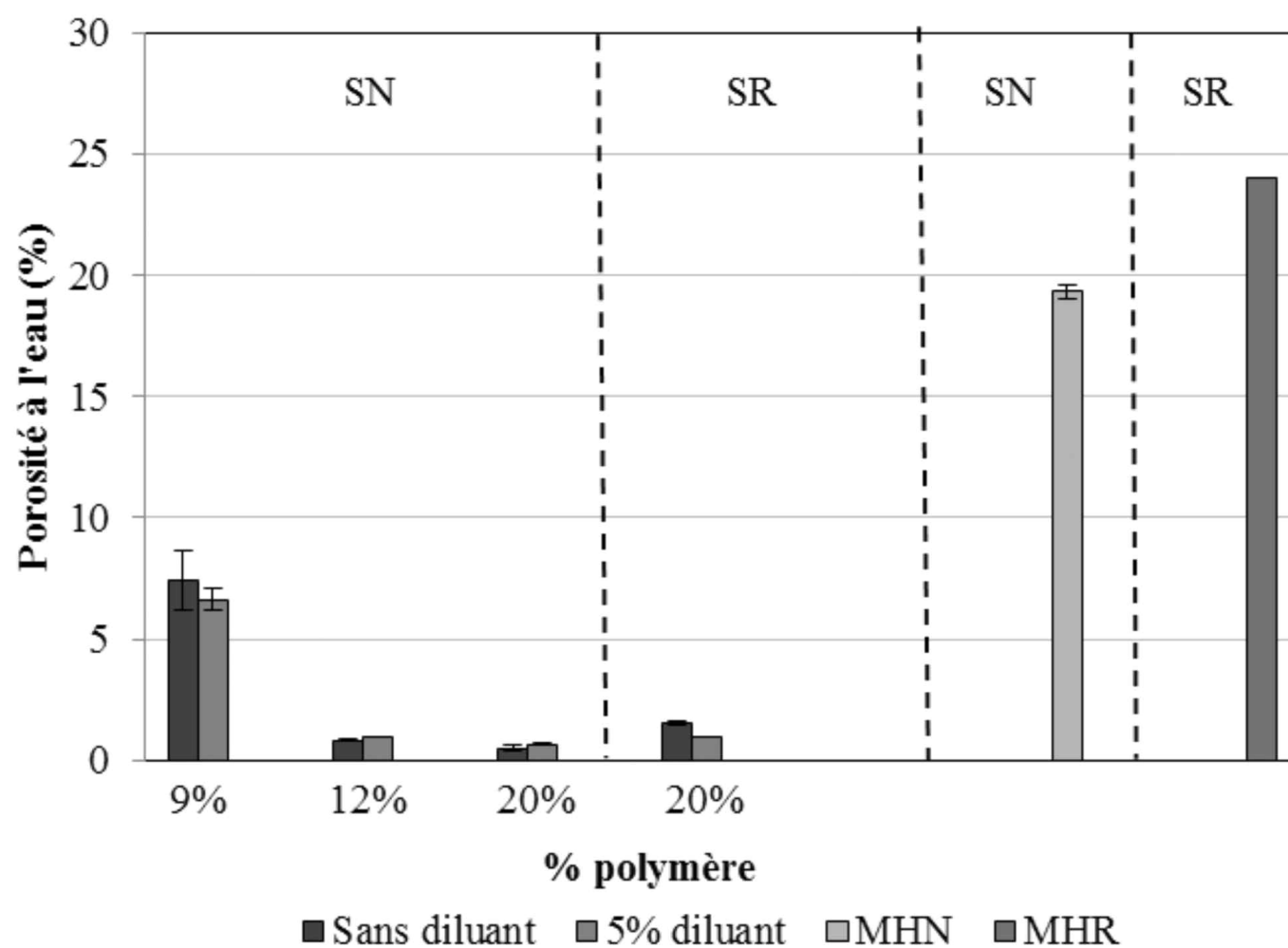


Figure 7 : Évolution de la porosité en fonction du pourcentage de polymère, du type de sable et de la contenance en diluant.

sité est donc considérée comme un indicateur de durabilité. Les mesures des porosités accessibles à l'eau des mortiers à 28 jours sont présentées dans la figure 7.

Les résultats obtenus révèlent que lorsque le pourcentage de polymère augmente la porosité diminue : elle passe de 7% pour $m_p = 9\%$ à 0,5% pour $m_p = 20\%$. L'ajout de l'octanoate de méthyle n'a pas d'effet significatif sur la porosité. Remarquons, par ailleurs, que la substitution totale du sable normalisé par du sable recyclé génère une légère augmentation de la porosité du MR élaboré avec $m_p = 20\%$. Celle-ci reste néanmoins faible de l'ordre de 1,5%. Signalons enfin que les valeurs de porosité des mortiers de résine demeurent remarquablement inférieures à celle du mortier hydraulique normalisé et celle du mortier hydraulique recyclé qui sont égales respectivement à 19,5% et 24%.

3.3. Résistances mécaniques

Des essais de flexion et de compression ont été réalisés sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, selon la norme NF EN 196-1, à 28 jours. La conservation des éprouvettes est effectuée à 30°C et une humidité de 48% RH, valeurs proches de celles des conditions d'utilisation. L'illustration des résultats obtenus (figure 8) révèle que les résistances mécaniques sont d'autant plus importantes que le pourcentage de polymère est élevé.

La substitution du sable normalisé par le sable recyclé pour le MR engendre une diminution de la résistance à la flexion et celle à la compression. À 28 jours, la résistance à la flexion passe de 31 MPa à 23 MPa et celle à la compression de 114 MPa à 102 MPa. L'ajout de l'octanoate de méthyle à la composition des MR provoque une diminution de la résistance à la compression. Ainsi, à 28 jours elle passe de 87 MPa à 61 MPa pour $m_p = 12\%$ et 5% de diluant. Cette diminution est expliquée par le fait que le

diluant plastifie le réseau tridimensionnel de la résine à l'état réticulé (durci). De ce fait la rigidité et la résistance du liant époxyde s'en trouvent alors que sa ductilité augmentée. Cependant, il est important de noter que les résistances mécaniques des mortiers de résine restent nettement plus élevées que celles des mortiers hydrauliques notamment celles à la flexion.

3.4. Migration des ions chlorures

Afin d'étudier la résistance des mortiers de résine à la diffusion des ions chlorures nous avons réalisé un essai de migration en régime transitoire (Non Steady State Migration). Cet essai, développé par Tang et Nilsson [TAN 92], présente l'avantage de fournir un résultat au bout de 24 heures ; il permet de calculer le coefficient de diffusion apparent D_{nssm} . L'évolution de ce coefficient a été étudiée en fonction du pourcentage de polymère, du type de sable et de la teneur en octanoate de méthyle. La figure 9 montre que plus le pourcentage du polymère dans le mortier à sable normalisé augmente, plus le coefficient de diffusion des ions chlorure diminue. Pour un taux massique de polymère de 20%, le D_{nssm} est égal à $0,11 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. En remplaçant le sable normalisé par le sable recyclé le D_{nssm} passe à $0,75 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. En revanche, l'ajout de l'octanoate de méthyle, dans la composition des mortiers de résine, n'a pas d'influence significative sur la migration des ions chlorures dans ces mortiers. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux trouvés pour le mortier hydraulique normalisé dont le coefficient de diffusion est égal à $10,66 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et le mortier hydraulique recyclé qui est caractérisé par un D_{nssm} de $19 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette comparaison montre que toutes les formulations de mortiers de résine réalisées ont une résistance à la diffusion des ions chlorures beaucoup plus élevée que celle des mortiers hydrauliques. En effet la diffusion des ions chlorures dans les matériaux cimentaires

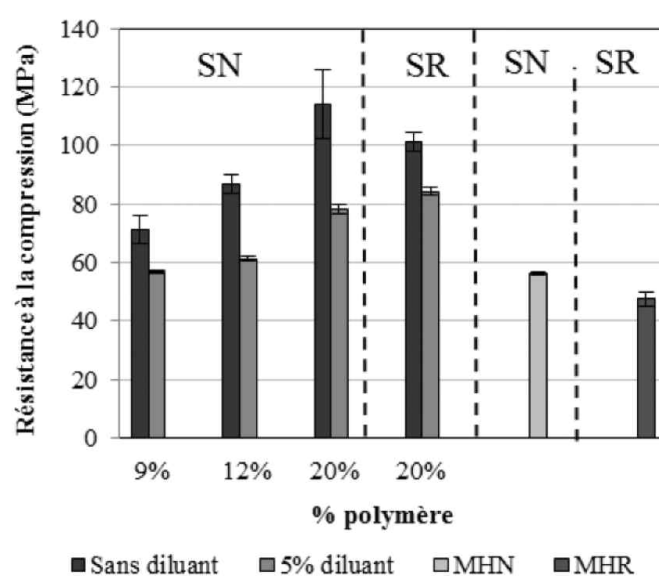
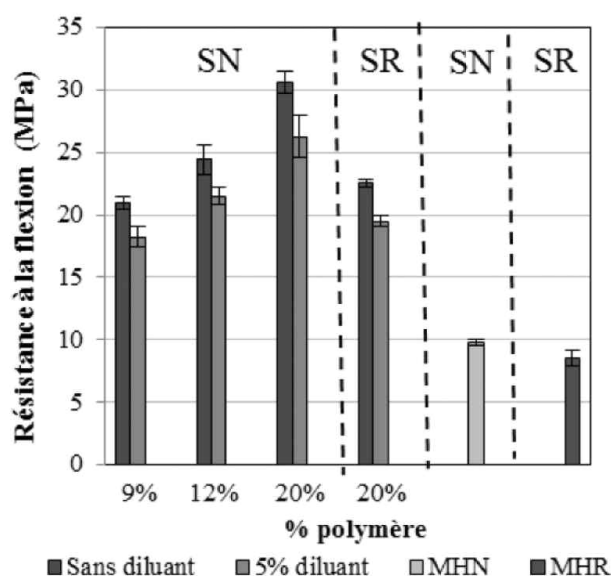


Figure 8 : Évolution des résistances mécaniques à 28 jours en fonction du pourcentage de polymère, du pourcentage du diluant et du type de sable.

est reliée à différents phénomènes qui s'interfèrent, alors que dans les mortiers résineux cette diffusion est essentiellement reliée à la porosité qui est très faible. En milieu riche en chlorure de sodium, comme dans le cas des structures immergées dans de l'eau de mer, les ions chlorures pénètrent dans le béton par diffusion, due à un gradient de concentration entre la surface contenant des chlorures en grande quantité et le cœur qui en est exempt [NGU 06]. Deux formes de chlorures peuvent exister dans la structure interne du béton [NUG 02] [MAT 07] : les chlorures liés, fixés par le béton et les chlorures libres sous forme ionique dans la solution interstitielle. Les phénomènes d'interactions ions-matrice fixent une partie des ions chlorures, par conséquent le transport ionique est fortement influencé par cette fixation. Ces ions peuvent se fixer de deux façons [HAS 14] [NUG 02] : soit se lier chimiquement avec des produits anhydres n'ayant pas réagi lors de la maturation afin de former de nouveaux composés à base de chlorures, soit se lier physiquement par adsorption dans les pores du solide. Plusieurs études ont montré que les chlorures réagissent avec les constituants du ciment et que leur fixation dépend de la teneur totale en aluminates qui sont les aluminates tricalciques (C_3A) et les aluminoferrites tricalciques (C_4AF) [BON], pour donner respectivement des monochloroaluminates de calcium hydratés (ou sel de Friedel $C_3A.CaCl_2.10H_2O$) et des monochloroferrites de calcium hydratés $C_3F.CaCl_2.10H_2O$.

La structure poreuse et la distribution des pores au sein du mortier jouent donc un rôle très important dans les phénomènes de transport et d'interaction avec le milieu extérieur. En effet, nous remarquons que la diffusion des ions chlorures dans les mortiers est étroitement reliée à la porosité. La figure 10 décrit l'évolution du coefficient D_{nsm} en fonction de la porosité accessible à l'eau. Il est à noter que plus la porosité est importante plus la capacité des ions chlorures à migrer dans le mortier est importante quel que soit la formulation du mortier pourvu que la nature physico-chimique du liant est identique (sans et avec diluant pour

le liant époxyde). En effet, les ions chlorures ne manifestent aucune interaction avec la matrice organique et donc leur diffusion dans les mortiers de résine dépend uniquement de la porosité sous l'effet d'un gradient de concentration.

4. CONCLUSION

Il ressort de cette étude que les mortiers de résine (époxy-amine/sable) étudiés présentent une ouvrabilité qui s'améliore avec l'augmentation du pourcentage du liant époxyde et avec l'ajout du diluant, l'octanoate de méthyle. Le mortier formulé avec 20% de polymère et du sable normalisé manifeste la meilleure ouvrabilité. La substitution de ce sable par le sable recyclé modifie la classe de consistance du mortier, en effet, l'affaissement diminue. Les résistances mécaniques, à l'état durci, ont été mesurées. Les résultats montrent que le mortier formulé avec 20% de polymère et du sable normalisé présente la résistance mécanique la plus élevée.

Les indicateurs de durabilité des mortiers de résine ont été testés à l'âge de 28 jours. Ils ont permis de constater que, d'une part la porosité décroît avec l'augmentation de la teneur en polymère et par conséquent la résistance à la migration des ions chlorures dans les mortiers augmente. D'autre part le mortier formulé avec 20% de résine et du sable recyclé présente une résistance à la migration des ions chlorures plus faible que celle du mortier à sable normalisé. Cependant cette résistance à la diffusion des ions chlorures reste toujours plus élevées comparées à celles des mortiers à base cimentaire.

Enfin, cette étude permet de conclure que le mortier de résine le mieux adapté à la réparation est le mortier formulé avec 20% de polymère, 5% d'octanoate de méthyle, et du sable normalisé. Cependant la valorisation du sable recyclé pour la fabrication des mortiers à base de résine époxyde semble une voie prometteuse.

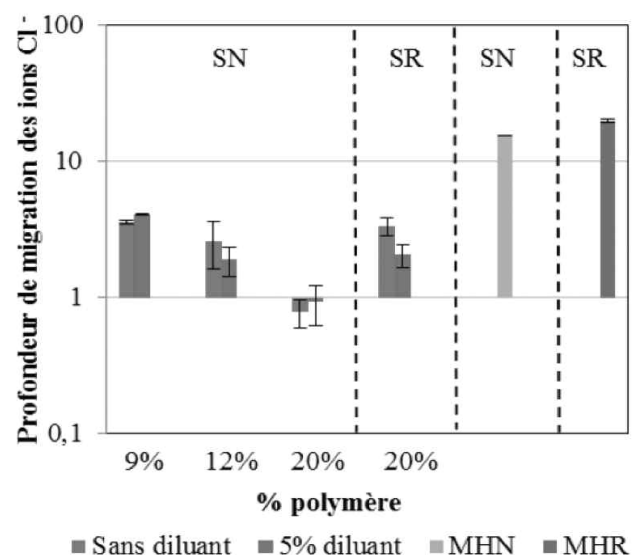
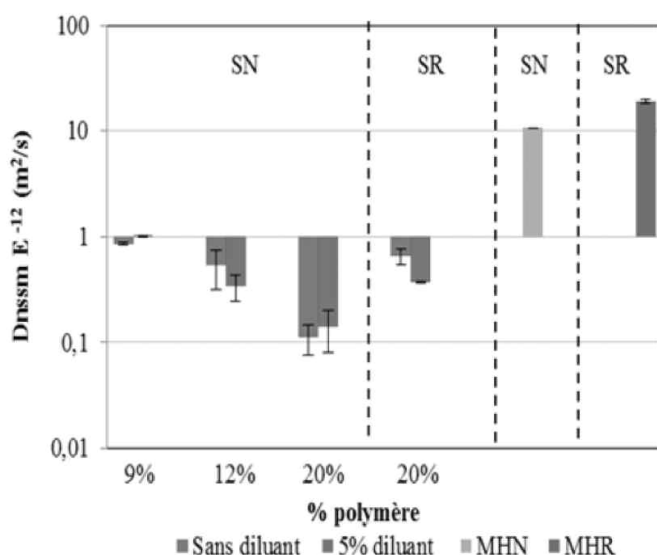


Figure 9 : Évolution du coefficient de diffusion et de la profondeur de migration des ions chlorures en fonction du pourcentage de résine, du type de sable et de la contenance en diluant.

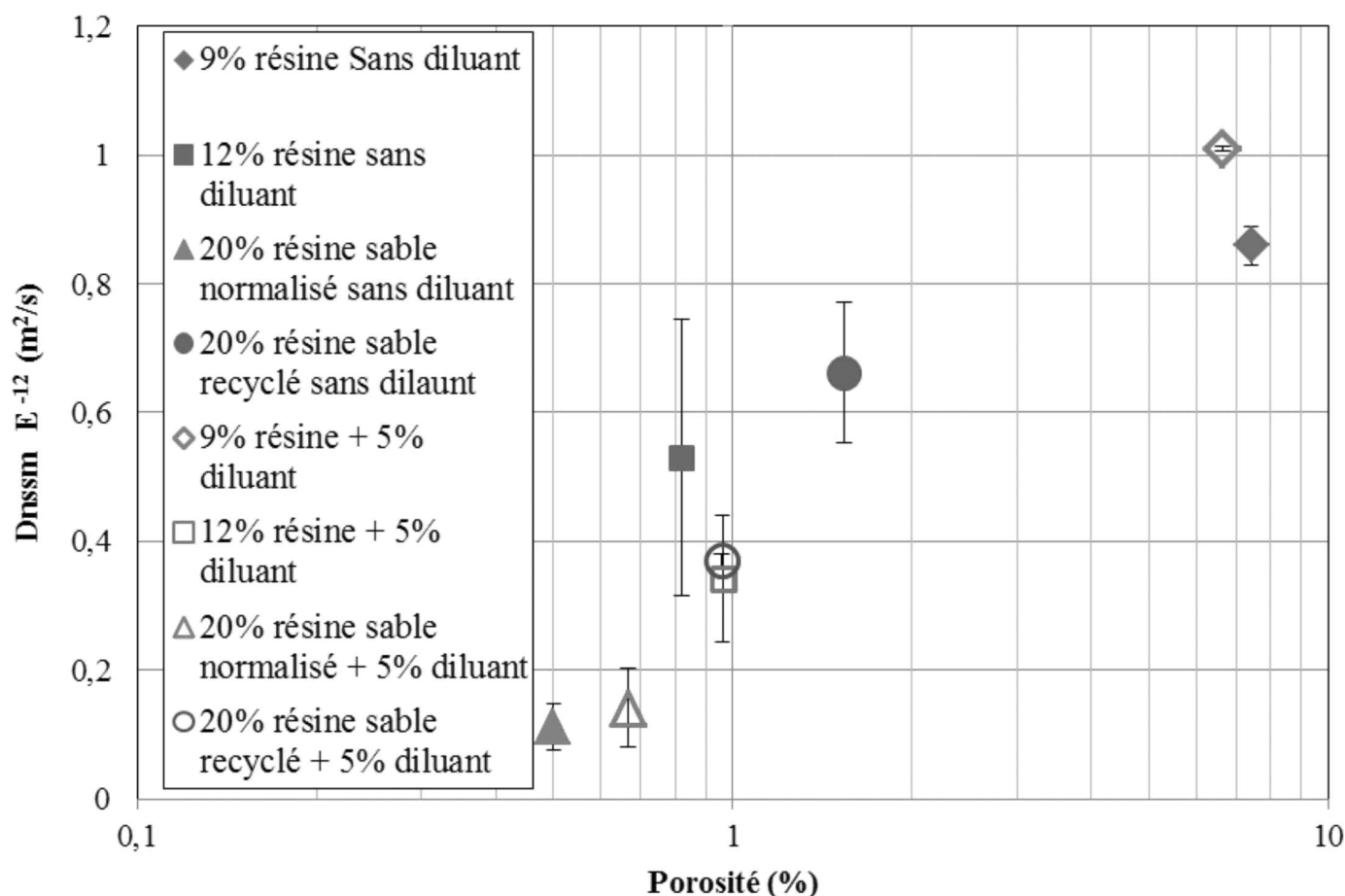


Figure 10 : Évolution du coefficient de diffusion des ions chlorures en fonction de la porosité.

5. REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier vivement BOSTIK (le fournisseur de la résine) qui fût d'une aide précieuse dans la réalisation de ce travail. Je suis également très reconnaissante au projet national Recybeton pour m'avoir fourni le sable recyclé. Enfin je tiens aussi à remercier le projet CMCU PHC-Utique (Campus France) qui a financé une partie de mes travaux de thèse.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [BAG 97] Bagel L., V. Kivica, "Relationship between pore structure and permeability of hardened cement mortars: on the choice of effective pore structure parameter", *Cement and Concrete Research*, vol. 27, 1997, p. 1225-1235.
- [BON] Bonnet S., « Influence du chlore sur le comportement à l'équilibre et sur les propriétés de transfert de matériaux Du génie Civil », PhD thesis, INSA de Toulouse, 1997.
- [BOU 14] Bourguiba A., Ghorbel E., Dhaoui W., « Effets de l'introduction d'un diluant sur les propriétés physiques et rhéologiques des mortiers à base de résine époxyde », 32^{es} rencontres de l'AUGC, Orléans 4 au 6 juin 2014.
- [HAS 14] HASSOUNE M., GHOMARI F., KHELIDJ A., BEZZAR A., TOUIL B., « Influence des paramètres de composition et de cure sur la diffusivité des bétons à base de matériaux locaux », *Nature & Technologie. A- Sciences fondamentales et Engineering*, vol. 10, 2014, p. 02-09.
- [MAT 07] Matschei T., Lothenbach B., Glasser FP., "The AFm phase in Portland cement", *Cement and Concrete Research*, vol. 37(2), 2007, p. 118-130.
- [NF P 18-459,10] NF P 18-459, Béton, Essai pour béton durci, Essai de porosité et de masse volumique, 2010.
- [NGU 06] Nguyen T.Q., Baroghel-Bouny V., Dangla P., P. Belin, "Numerical modelling of chloride ingress into saturated concrete", in 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete Through Science and Engineering, Quebec City, Canada, 2006, RILEM.
- [NTBuild192, 99] NT Build192, Concrete, mortar and cement based repair materials: chloride migration coefficient from non steady state migration experiments. Nordtest, 1999.
- [NUG02] Nogue F., « Recherche d'une méthode rapide de détermination du coefficient de diffusion en milieu cimentaire saturé », PhD thesis, INSA Toulouse, 2002.
- [TAN 92] Tang, L., Nilsson, L. O., "Rapid determination of chloride diffusivity in concrete by applying an electrical field", *ACI Materials Journals*, vol. 89 (1), 1992, p. 49-53.