

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE DE L'INFLUENCE DES GRANULATS RECYCLÉS SUR LES CYCLES HUMIDIFICATION SÉCHAGE DANS UN BÉTON.

A. Fanara^A, J. Hubert^A, F. Michel^A, F. Collin^A et L. Courard^A

A Urban and Environmental Engineering, Université de Liège, Belgique

RÉSUMÉ : Les processus de dégradation des bétons armés, tels que la corrosion par ions chlorure, dépendent souvent des cycles humidification séchage. En effet, ces cycles sont la cause principale de pénétration d'agents tels que les ions chlorure. Un programme expérimental et de modélisation a été mené sur différents matériaux à base cimentaire, notamment des bétons de granulats naturels et recyclés. Ceux-ci interviennent de plus en plus dans la composition des bétons et ce phénomène ne fait que se développer, ce qui permet non seulement de limiter la consommation de ressources primaires mais aussi de valoriser des "déchets" encombrants. La particularité de ces granulats réside en la pâte de mortier adhérente, souvent plus poreuse et micro-fracturée. Celle-ci amplifie dès lors le phénomène d'humidification et de séchage du matériau poreux, en augmentant ses propriétés de perméabilité et de diffusion.

1. INTRODUCTION

Les structures en béton armé sont construites avec une durée de vie attendue pouvant atteindre le siècle. Au cours de leur utilisation, elles seront soumises à divers processus de dégradation, dont la carbonatation et les attaques aux chlorures par exemple. Ces procédés de dégradations vont souvent interagir entre eux, de sorte à grandement nuire à la durée de vie d'un ouvrage (R.A. Patel et al., 2017) (P.S. Mangat et al., 1994). Dans la grande majorité des cas, ces processus de dégradation nécessitent la présence d'eau, en plus ou moins grande quantité, dans la structure poreuse du béton (M. Morga et al., 2015). C'est notamment le cas des attaques aux chlorures : les ions chlorures vont pénétrer la structure poreuse du béton en phase dissoute, ce qui nécessite un chemin continu d'eau liquide. Dès lors, la bonne compréhension des processus d'humidification séchage est importante pour appréhender au mieux les problèmes de durabilité qui pourront apparaître dans une structure en béton armé.

De nombreux paramètres peuvent influencer les procédés de transfert d'eau dans le béton, dont, principalement, sa composition (A. Fanara et al., 2022). Les granulats sont le principal ingrédient du béton, et leurs propriétés ont dès lors un rôle critique sur la durabilité : leurs propriétés physiques, chimiques et géométriques sont calibrées dans le respect de certaines normes (D. Pedro et al., 2015). Ces normes ont été élaborées pour des matériaux naturels. Cependant, de plus en plus de matériaux recyclés font leur apparition dans l'élaboration de bétons, notamment les granulats de béton recyclés. Ces granulats, obtenus par concassage d'anciens éléments en béton, contiennent une pâte de mortier adhérente, souvent plus poreuse et micro-fracturée, ce qui peut faciliter les transferts d'eau et la pénétration d'agents externes (M.S. de Juan et al., 2009)(D. Pedro et al., 2014). Il est donc plus compliqué, pour ces granulats recyclés, de respecter les normes en vigueur.

Ces granulats recyclés sont étudiés depuis longtemps, que ce soit d'un point de vue mécanique (G. Fathifazl et al., 2011)(P.S. Lovato et al., 2012) ou bien, de manière plus récente, d'un point de vue durabilité (S.M. Levy et al., 2004)(S.P. Arredondo-Rea et al., 2012). En s'intéressant aux phénomènes de transport dans le béton, on remarque que ce sujet n'a pas encore été abordé de manière intensive. Pour pallier à cela, une étude approfondie est nécessaire : une phase expérimentale permettra la caractérisation des phénomènes de transport dans les bétons, aussi bien ceux réalisés à base de granulats recyclés que ceux à base de granulats naturels. Ensuite, un modèle numérique sera développé et alimenté par les propriétés obtenues expérimentalement. Une application sera ensuite réalisée pour déterminer la différence de durabilité possible entre un béton naturel et un béton de granulats recyclés.

La modélisation numérique se fera dans un programme d'éléments finis non linéaires développé à l'Université de Liège : Lagamine (F. Collin et al., 2002). Ce modèle suit le formalisme multi-échelle des éléments finis au carré (FE²) selon lequel deux échelles sont définies afin de représenter au mieux la complexité du béton.

En effet, le béton est un matériau très hétérogène de par sa microstructure : celle-ci comprend des pores de l'ordre du nanomètre ainsi que des agrégats centimétriques, ce qui représente une grande dispersion de taille et donc des propriétés hétérogènes (Garboczi & Bentz, 1998). Toute cette complexité ne saurait dès lors être représentée dans un seul modèle, et des choix doivent être posés. De manière générale, les modèles utilisent des propriétés homogénéisées du béton, afin de réduire le coût de calcul. Cependant, les outils actuels nous permettent une plus grande précision : la modélisation multi-échelle et l'homogénéisation numérique permettent de représenter le béton à une échelle plus fine (de l'ordre du granulat dans notre cas) pour ensuite extrapoler les résultats à une échelle supérieure (celle d'une structure par exemple) (Nilenius, 2014)(Bertrand et al., 2020). Selon la méthode FE², les équations de comportement (telles que la loi de Darcy ou de Fick, pour l'advection et la diffusion respectivement) sont résolues à l'échelle du granulat, en différenciant la nature du matériau (nouveau mortier ou mortier adhérent dans notre cas, les granulats étant imperméables). Les résultats de chaque matériau sont ensuite intégrés pour obtenir une représentation globale du comportement du matériau. Cette homogénéisation est dite numérique : c'est la méthode de la cellule unitaire, basée sur le concept de volume élémentaire représentatif (Kouznetsova et al., 2001). Les équations phénoménologiques, à l'échelle macroscopique, sont dès lors remplacées par des moyennes sur le volume élémentaire. En utilisant cette méthode, on fait l'hypothèse que les propriétés et le comportement du matériau étudié ne sont pas valides en tout point de la structure mais uniquement à certains points macroscopiques où le calcul est réalisé. Le volume élémentaire, comme mentionné précédemment, possède l'échelle d'un granulat : il s'agit d'une tranche de béton pluri-centimétrique, dans laquelle les granulats sont imperméables et le mortier est homogénéisé, afin de ne pas augmenter le coût de calcul inutilement. Le mortier reste donc un matériau composite dont les propriétés utilisées sont des propriétés effectives (Xi et Bazant, 1999).

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1 Composition des matériaux utilisés

Plusieurs matériaux ont été réalisés puis testés au laboratoire dans le cadre de cette recherche :

- NAC : un micro-béton avec des granulats naturels calcaires 2/7 ;
- RAC : le même micro-béton mais avec des granulats de béton recyclés, dont la substitution se fait à volume constant et la courbe granulométrique est reproduite à l'identique ;
- E-M : un mortier équivalent avec du sable du Rhin 0/2, confectionné de sorte que celui-ci ressemble au mortier des deux micro-bétons.

Les compositions exactes de ces matériaux sont visibles sur le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 - Compositions et rapport eau/ciment des matériaux utilisés

| Composition | M_granulats (kg/m ³) | M_sable (kg/m ³) | M_ciment (kg/m ³) | M_eau (kg/m ³) | E/C (-) | E/C efficace (-) |
|-------------|-------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|------------|---------------------|
| NAC | 1111 | 643 | 320 | 172.5 | 0.54 | 0.5 |
| RAC | 946 | 643 | 320 | 201.5 | 0.63 | 0.5 |
| E-M | - | 1337 | 622.5 | 336 | 0.54 | 0.54 |

2.1 Description du programme expérimental et résultats

Plusieurs expériences ont été réalisées afin d'obtenir des propriétés macroscopiques homogénéisées de nos matériaux. En comparant les propriétés entre ces matériaux, nous pourrions en déduire des tendances quant à l'influence de la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés sur les cycles humidification séchage. Les propriétés du mortier seront utiles, quant à elles, pour le modèle numérique.

Sans rentrer dans les détails pour autant (pour plus de détails, se référer à (Fanara et al., 2023)), voici les expériences réalisées et les propriétés étudiées :

- Absorption d'eau par immersion (NBN B 15-215:2018 et NBN EN 772-4) : densité sèche et humide, absorption d'eau et porosité accessible à l'eau ;
- Perméabilité à l'eau (NBN EN ISO 17892-11:2019) : perméabilité intrinsèque à l'eau du matériau ;
- Sorption et désorption statiques : courbes de rétention d'eau, reliant le degré de saturation du milieu poreux aux conditions environnementales (humidité relative et température) au travers de la succion.
- Diffusion d'ions chlorure sous régime permanent et transitoire : coefficient de diffusion d'ions chlorures.

Les principales propriétés intrinsèques des matériaux étudiés, obtenues grâce au programme expérimental ci-dessus, sont affichées dans le Tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 - Résultats de la campagne expérimentale

| Paramètres | E-M | NAC | RAC |
|--|----------------|----------------|----------------|
| <i>Absorption d'eau par immersion</i> | | | |
| Densité sèche [kg/m ³] | 2025 | 2263 | 2061 |
| Densité saturée [kg/m ³] | 2253 | 2405 | 2266 |
| Absorption d'eau [% Mass] | 11.27 | 6.26 | 9.95 |
| Porosité [% Volume] | 22.83 | 14.16 | 20.5 |
| <i>Perméabilité intrinsèque à l'eau</i> | | | |
| Perméabilité intrinsèque [10 ⁻¹⁹ m ²] | 38.7 | 1.73 | 2.58 |
| <i>Sorption et désorption statique</i> | | | |
| Pression d'entrée d'air [MPa] en sorption/désorption | 2.75/11.55 | 3.45/13.83 | 3.56/10.43 |
| Paramètre n_{VG} (slope) [-] en sorption/désorption | 1.49/1.51 | 1.51/1.53 | 1.51/1.48 |
| <i>Diffusion sous régime permanent</i> | | | |
| D_{eff} [10 ⁻¹³ m ² /s] | 8.17 | 5.99 | 15.4 |
| <i>Diffusion sous régime transitoire</i> | | | |
| D_{app} [10 ⁻¹¹ m ² /s] at 15/29/91 days | 1.71/1.43/0.92 | 1.77/1.41/2.77 | 2.46/1.65/1.78 |
| Profondeur de [Cl] = 0.4% masse totale [mm] à 15/29/91 jours | 11.9/15.1/21.5 | 12.2/15.1/37.5 | 15.8/18.0/33.1 |

L'essai d'absorption d'eau par immersion a montré que le mortier E-M possède la plus grande porosité et absorption d'eau, suivie par le béton recyclé RAC et finalement le naturel NAC. Cela semble logique, la porosité étant trouvée dans le mortier principalement, et la teneur en mortier des granulats recyclés augmente donc la porosité et l'absorption d'eau du béton recyclé. La même logique se retrouve dans l'essai de perméabilité intrinsèque : le mortier est bien plus perméable que les deux bétons. En effet, les granulats étant imperméables, ils diminuent le volume au travers duquel l'eau peut s'écouler, et augmentent également la tortuosité, de sorte à diminuer grandement la perméabilité.

L'essai de sorption et désorption statique nous fournit plusieurs informations, la principale étant la pression d'entrée d'air. Le RAC possède la plus faible pression d'entrée d'air, suivi par le mortier et finalement le NAC. Cela signifie que dans un même environnement (en terme de température et d'humidité relative), le degré de saturation du béton de granulats recyclés va atteindre un équilibre plus

rapidement que le béton de granulats naturels, les échanges d'humidité étant plus importants avec son environnement. Cependant, cela signifie que la perméabilité relative à l'eau du matériau chutera plus vite en dé-saturant, et donc cela pourrait créer une zone « bouchon » de moindre perméabilité relative en surface, diminuant les échanges avec l'environnement (Fanara et al., 2022).

Finalement, les essais de diffusion d'ions chlorure en régime transitoire montrent que le coefficient de diffusion peut grandement changer au cours du temps. De manière générale cependant, on peut conclure que le béton de granulats recyclés possède un plus grand coefficient de diffusion d'ions chlorure que le naturel, si ce n'est à 90 jours. Le mortier, quant à lui, semble se trouver entre les deux. Des phénomènes d'adsorptions chimiques et physiques pourraient être liés à ces changements de coefficients de diffusion au cours du temps.

4. MODÈLE NUMÉRIQUE

4.1 Formulation générale du modèle multi-échelle

Un modèle élément fini multi-échelle (FE²) repose sur quatre étapes :

1. La localisation : les conditions aux limites de l'échelle macroscopique (une structure de béton armé par exemple) sont localisées pour chaque point d'intégration du maillage. En chacun de ses points, un volume élémentaire représentatif (VER) joue le rôle de la microstructure (une tranche de béton de plusieurs centimètres de large dans notre cas). On va donc appliquer de nouvelles conditions aux limites locales propres à chaque VER, en fonction des conditions aux limites appliquées à la macrostructure et de la position du VER sur celle-ci.
2. La résolution du problème à l'échelle inférieure : sur base des nouvelles conditions aux limites appliquées sur le VER, un problème par éléments finis est résolu. Cette résolution se fait sous l'hypothèse d'un régime permanent. Pour que cette hypothèse tienne la route, il faut que la taille du VER soit grandement inférieure à l'échelle du domaine macroscopique (Fanara et al., 2022b). C'est le cas ici puisque l'on passe de l'ordre du centimètre à l'ordre du mètre.
3. L'homogénéisation : une fois le problème résolu à l'échelle microscopique, les flux obtenus sont moyennés sur le domaine du VER, afin d'obtenir une valeur unique pour chaque point d'intégration macroscopique.
4. La résolution du problème à l'échelle supérieure : une fois ce calcul réalisé pour chaque point d'intégration macroscopique, une réponse peut être obtenue à cette échelle en résolvant un problème par élément fini, d'où l'appellation FE².

Plus de détails sur la méthode peuvent être trouvés dans un précédent papier (Fanara et al., 2022b).

4.2 Modélisation du VER

Le VER doit représenter la microstructure de notre béton de manière adéquate. Notre souhait étant de déterminer l'influence de la substitution de granulats naturels par des granulats recyclés sur la durabilité des bétons et sur les phénomènes de transports internes, nous allons faire plusieurs hypothèses. Premièrement, le VER est multiphasique : des granulats imperméables sont enrobés dans une matrice de mortier, laquelle est hétérogène mais approchée par des propriétés homogénéisées. En effet, augmenter la complexité du modèle en modélisant le mortier de manière plus précise, avec des grains de sable par exemple, ne serait pas avantageux tant cela augmenterait le coût numérique du modèle.

Dans le cas de béton de granulats recyclés, les granulats modélisés sont composés de granulats naturels eux-mêmes enrobés d'une couche plus ou moins homogène de mortier adhérent (voir Figure 1). Afin de rendre le VER le plus représentatif possible, celui-ci doit respecter plusieurs critères propres au béton modélisé : la fraction surfacique des granulats, le rapport d'aspect et la courbe granulométrique du béton réalisé en laboratoire sont respectés. L'algorithme de génération du VER est expliqué avec plus de détails dans (Fanara et al., 2022b).

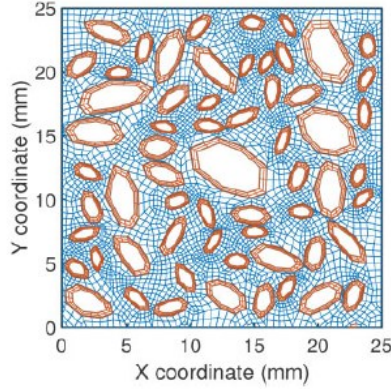


Figure 1 - Exemple de volume élémentaire représentatif pour un béton de granulats recyclés

4.3 Équations constitutives du modèle à l'échelle inférieure.

Le modèle est développé pour des conditions saturées et non-saturées. L'équation de conservation de la masse d'eau liquide dans le milieu poreux, sous l'hypothèse d'un système fixe et indéformable en régime permanent, s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_w v_i^w) = 0 \quad (1)$$

où ρ_w est la densité de l'eau [kg/m³] et v_i^w est le flux d'eau liquide par unité de surface [m/s]. La densité de l'eau liquide varie avec la pression interne, de sorte que :

$$\rho_w = \rho_{w0} \times \left(1 + \frac{P_{w,average} - P_{w0}}{\chi_w} \right) \quad (2)$$

où ρ_{w0} est la densité initiale de l'eau, $P_{w,average}$ [Pa] est la pression au point d'intégration macroscopique (égale à la moyenne des pressions sur le VER) et P_{w0} est la pression initiale à l'intérieur de la structure poreuse (pression à laquelle est calculée la densité initiale de l'eau). Cette relation fait également intervenir la compressibilité de l'eau χ_w , égale à 2E+9 Pa⁻¹ à 20°C.

Le second terme de l'équation de conservation de la masse d'eau est le flux convectif d'eau. Pour obtenir ce terme, on utilise la loi de Darcy. Sous l'hypothèse d'un milieu homogène perméable, et en l'absence de forces gravitationnelles, le flux de fluide et le gradient de pression d'eau sont directement proportionnels de sorte que la loi de Darcy s'écrit :

$$v_i^w = - \frac{k_{int} k_{rel,w}}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial x_i} \quad (3)$$

où k_{int} est la perméabilité intrinsèque du milieu [m²] et $k_{rel,w}$ est la perméabilité relative de l'eau [-], μ_w est la viscosité dynamique de l'eau [kg/m.s] et finalement, le dernier terme représente le gradient de pression d'eau.

La perméabilité relative de l'eau est dépendante du degré de saturation de la matrice poreuse. Elle vaut donc 0 en conditions parfaitement sèches et 1 en conditions parfaitement saturées. Nous utilisons la relation empirique de Van Genuchten pour la décrire (M. T. Van Genuchten, 1980) :

$$k_{rel,w} = \sqrt{S_{r,w}} \times \left[1 - \left(1 - S_{r,w}^{\frac{1}{m_{VG}}} \right)^{m_{VG}} \right]^2 \quad (4)$$

où $S_{r,w}$ [-] est le degré de saturation en eau liquide du milieu poreux, et m_{VG} [-] est un paramètre du modèle associé à la courbure de la courbe de rétention d'eau (Fanara et al., 2022). Le degré de saturation en eau liquide du milieu poreux est également obtenu par une relation empirique de Van Genuchten (M. T. Van Genuchten, 1980) :

$$S_{r,w} = S_{res} + (S_{sat} - S_{res}) \times \left[1 + \left(\frac{s}{\alpha_{VG}} \right)^{n_{VG}} \right]^{-m_{VG}} \quad (5)$$

avec n_{VG} , un autre paramètre du modèle [-] lié au taux de désaturation du sol (et égal à $1/(1 - m_{VG})$) et α_{VG} [Pa] la pression d'entrée d'air. Les deux autres termes S_{sat} et S_{res} sont, respectivement, le degré de saturation maximum du milieu (souvent égal à 1) et le degré de saturation résiduel du milieu (souvent égal à 0). Finalement, la succion s [Pa] est définie telle que la succion matricielle, autrement dit c'est la différence entre la pression de gaz et la pression d'eau :

$$s = p_g - p_w \quad (6)$$

L'équation de conservation de la masse d'air dans la matrice poreuse du béton s'écrit, sous les mêmes hypothèses que pour l'eau liquide :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho_g v_i^g) = 0 \quad (7)$$

où ρ_g est la densité de l'air [kg/m³] et v_i^g est le flux d'air par unité d'aire [m/s]. La densité de l'air varie avec la pression interne, de sorte que :

$$\rho_g = \rho_{g0} \times \left(\frac{P_{g,average}}{P_{g0}} \right) \quad (8)$$

où ρ_{g0} est la densité initiale de l'air, $P_{g,average}$ [Pa] est la pression au point d'intégration macroscopique (égale à la moyenne des pressions sur le VER) et P_{g0} est la pression initiale à l'intérieur de la structure poreuse (pression à laquelle est calculée la densité initiale de l'air).

Le second terme de l'équation de conservation de la masse d'air est le flux convectif d'air. Pour obtenir ce terme, on utilise également la loi de Darcy. Sous les mêmes hypothèses que pour le flux d'eau, on obtient :

$$v_i^g = - \frac{k_{int} k_{rel,g}}{\mu_g} \frac{\partial P_g}{\partial x_i} \quad (9)$$

où k_{int} est la perméabilité intrinsèque du milieu [m²] et $k_{rel,g}$ est la perméabilité relative de l'air [-], μ_g est la viscosité dynamique de l'air [kg/m.s] et finalement, le dernier terme représente le gradient de pression d'air.

La perméabilité relative de l'air est calculée avec la même équation que pour l'eau, sous le principe que la matrice poreuse doit être complètement remplie d'un mélange d'eau liquide et d'air. Dès lors, l'addition du degré de saturation de l'eau liquide et du degré de saturation de l'air doit valoir 1 :

$$k_{rel,g} = \sqrt{1 - S_{r,w}} \times \left(1 - S_{r,w}^{\frac{1}{m_{VG}}} \right)^{2m_{VG}} \quad (10)$$

Pour compléter ce modèle, deux composants doivent encore être ajoutés : un terme d'air dissous dans l'eau liquide, et un terme de vapeur d'eau dans l'air. Cependant, ceux-ci ne sont pas prédominants dans le cadre d'études sur le béton : considérer la vapeur d'eau n'est nécessaire qu'à haute température, où son volume devient important. Dans les conditions atmosphériques qui nous intéressent, ces deux phases ne sont donc pas prédominantes.

Le dernier composant à introduire dans ce modèle est donc le polluant, ici les ions chlorures, lesquels sont dissous dans l'eau liquide. L'équation de conservation de la masse de polluants dissous s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (v_i^c) = 0 \quad (11)$$

où v_i^c est le flux de polluant par unité d'aire [m/s]. Ce flux de polluant peut être causé par l'addition de trois phénomènes : l'advection, la dispersion et la diffusion. Le premier est un mouvement du polluant à l'intérieur de l'eau liquide, causé par le mouvement de cette dernière. Le second est dû à l'irrégularité de la matrice poreuse, ce qui peut causer des variations locales de la concentration. Finalement, le dernier phénomène de transport est dû au gradient de concentration du polluant à l'intérieur de l'eau liquide, indépendamment des mouvements de cette dernière. On peut donc écrire :

$$v_i^c = v_i^{advection} + v_i^{diffusion+dispersion} = C v_i^w - D \frac{\partial C}{\partial x_i} \quad (12)$$

où C [-] est la concentration moyenne du polluant dans le VER, v_i^w [m/s] est le flux d'eau liquide calculé par la loi de Darcy, et finalement D [m²/s] est le coefficient de diffusion du polluant dans l'eau liquide, ce dernier prenant également en compte le phénomène de dispersion. Le flux utilisé pour exprimer la convection étant le flux d'eau liquide, le polluant est supposé dissous dans l'eau liquide (comme c'est le cas pour des chlorures). Ce modèle pourrait également être adapté en utilisant le flux d'air en remplacement de celui d'eau liquide, afin d'introduire un polluant dissous dans l'air, tel que le CO₂ par exemple.

4.4 Réponse homogénéisée du modèle à l'échelle supérieure

Les équations constitutives présentées ci-dessus sont résolues à l'échelle inférieure, c'est-à-dire au sein du VER. Comme expliqué dans les sections précédentes, le problème aux valeurs limites est résolu par éléments finis à l'échelle inférieure, sous l'hypothèse de régime permanent, en utilisant des matrices de rigidité analytiques classiques. Les résultats sont ensuite homogénéisés numériquement : les flux de chaque point d'intégration du VER sont sommés proportionnellement à leur surface relative. Les flux homogénéisés sont ensuite envoyés au point d'intégration macroscopique correspondant au VER étudié. Finalement, les forces macroscopiques sont calculées et le problème est résolu en suivant une méthode d'éléments finis non-linéaires.

Cependant, les matrices de rigidité de l'échelle supérieure ne peuvent pas être calculées par des solutions analytiques, le problème étant profondément non-linéaire. Dès lors, ces matrices de rigidité macroscopiques sont obtenues par perturbation : les gradients et valeurs moyennes de la pression d'eau, de gaz et de la concentration en polluant sont perturbées l'une après l'autre. Au total, dix calculs sont donc réalisés à l'échelle inférieure (un non-perturbé et neuf perturbés), pour ensuite déterminer les termes de la matrice de rigidité tel que :

$$K_i = \frac{Flux_{i,perturbé} - Flux_{i,non-perturbé}}{Perturbation} \quad (13)$$

Ce procédé est lent et fastidieux, tant les calculs à l'échelle microscopique sont lourds. Cependant, le caractère non-linéaire du modèle n'offre pas d'autre option.

4.5 Validation du modèle

Le modèle numérique doit ensuite être validé afin de s'assurer qu'il représente de manière précise les phénomènes physiques pouvant être observés dans la vie réelle. Cette validation peut être analytique (dans le cas où des solutions analytiques sont disponibles), expérimentale ou bien numérique (en comparant avec d'autres modèles équivalents existants). Les trois types de validation ont été réalisés dans cette étude.

En conditions saturées, le modèle a été validé selon les trois méthodes. De manière analytique, le modèle a été comparé à une solution obtenue par P. Biver pour un milieu unidimensionnel semi-infini (P. Biver, 1993). Numériquement, le modèle multi-échelle a été comparé à un modèle simple échelle existant dans le programme utilisé, composé d'une loi de transfert d'eau et de gaz et couplé à une loi de transfert de polluants (P. Biver, 1993)(F. Collin et al., 2002). Expérimentalement, l'essai de diffusion d'ions chlorure réalisé sur nos compositions a été reproduit numériquement (A. Fanara et al., 2022c).

En conditions non-saturées, des expériences n'ont pas été réalisées, et des solutions analytiques ne sont pas obtenues aisément à cause de la non-linéarité du problème. Dès lors, la validation numérique est préférée : le même modèle simple échelle a donc été utilisé pour valider numériquement notre modèle multi-échelles en conditions non-saturées.

5. RÉOLUTION D'UNE APPLICATION NUMÉRIQUE

Notre modèle numérique multi-échelle étant construit et validé en conditions non-saturées, il est maintenant temps de l'appliquer à la réalisation d'une application. Celle-ci consiste en la modélisation d'un quai maritime, lequel est en contact avec de l'eau salée (qui possède donc une concentration en chlorures) ainsi qu'avec l'atmosphère.

Un mur de quai possède habituellement des dimensions assez importantes. Il n'est dès lors pas rare de trouver des murs d'un mètre d'épaisseur pour plusieurs dizaines de mètre de hauteur. Dans notre cas, faisant l'hypothèse de conditions symétriques de part et d'autre du mur, et suite à une analyse de sensibilité sur l'influence de la profondeur d'eau sur les phénomènes de transport, il a été décidé de modéliser un mur de quai haut de 6m pour 0.5m d'épaisseur. Celui-ci est divisé en deux zones selon sa hauteur : de 0 à 2m, le mur est complètement immergé. Ensuite, de 2 à 6m, il est soumis aux conditions atmosphériques.

En réalité, des phénomènes de marnées devraient être introduits, mais le coût numérique n'est pas envisageable à cette étape du travail.

Les conditions aux limites appliquées sont la pression d'eau et la concentration en polluant. Celles-ci proviennent de l'étude de J. Zuquan et al. (J. Zuquan et al., 2018). La quantité de chlorures dans l'eau de mer a été mesurée lors de leur étude : la quantité d'ions Cl^- était égale à 17533mg/L, soit à peu près 1.7%. Dans notre cas, nous allons arrondir cette mesure à 2%. Les conditions atmosphériques, c'est-à-dire température et humidité relative, ont également été mesurée et moyennée sur le mois. Ces mesures seront ensuite traduites en succion au travers de la loi de Kelvin (A. Fanara et al., 2022) :

$$s = \frac{-\rho_w R T}{M} \ln(HR) \quad (14)$$

où R est la constante des gaz parfaits (égale à 8.3143 J/K.mol) et M est la masse molaire de l'eau (égale à 18.016 g/mol). La température et l'humidité relative sont notées, respectivement, T [K] et HR [%]. Les valeurs utilisées sont disponibles dans le Tableau 3 ci-dessous.

Tableau 3 - Conditions atmosphériques mensuelles de l'application

| Mois | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| HR [%] | 62.5 | 63.9 | 65.8 | 69.5 | 72.5 | 81.9 | 86.1 | 81.4 | 69.3 | 65.2 | 66.3 | 63.9 |
| T [°C] | 0.3 | 2.21 | 6.13 | 11.41 | 16.92 | 20.80 | 24.77 | 25.61 | 22.34 | 16.49 | 9.08 | 2.87 |
| s [MPa] | -593.1 | -569.1 | -549.7 | -477.8 | -430.5 | -270.9 | -205.8 | -283.7 | -500 | -571.7 | -535.3 | -570.5 |

Ces conditions atmosphériques sont donc appliquées entre 2 et 6m de hauteur. Ensuite, entre 0 et 2m de hauteur, une pression hydrostatique est appliquée puisque le mur est constamment sous eau. La solution en chlorure y est également imposée à 2%. Pour des raisons purement numériques, une zone de transition est définie de 2m à 2.13m, afin d'adoucir le gradient de pression qui doit passer de 0 MPa à -593.1 MPa dans le pire des cas. Ces conditions sont appliquées sur la surface gauche du mur (sous l'hypothèse d'un chargement symétrique pour un mur d'un mètre d'épaisseur).

Des résultats sont visibles à la Figure 2 ci-dessous. Celle-ci représente les concentrations en ions chlorures dans le mur de quai, à 627 jours. Sur la gauche de la Figure 2 sont représentés les résultats pour le béton de granulats naturels, et sur la droite pour le béton de granulats recyclés.

Analysons les résultats en faisons abstraction des oscillations numériques (il s'agit des zones où la concentration descend sous 0% ou dépasse les 2% injectés) : deux phénomènes ont lieu conjointement, la diffusion et l'advection. Si le mur était complètement sous-eau, les résultats tendraient vers ceux visibles de 0 à 0.5m de hauteur : un front de chlorure pénètre selon des lignes verticales représentant une même concentration. Quand on rajoute l'advection dans l'équation, alors on obtient les résultats visibles entre 0.5 et 2.5m de hauteur : la convection du fluide des zones de faible succion vers les zones de haute succion entraîne une quantité de chlorure non-négligeable. Ceux-ci se concentrent donc à l'interface de transition entre les conditions atmosphériques et les conditions sous-eau, cette interface étant représentée par la ligne horizontale à 2m de hauteur.

En utilisant la droite verticale de référence (positionnée à 30cm à l'intérieur du mur de quai), on remarque qu'en réalité, le béton de granulats naturels possède une teneur en chlorure plus grande que le béton de granulats recyclés. Plusieurs raisons peuvent expliquer ce phénomène, la première étant la courbe de rétention d'eau. En effet, celle du béton de granulats recyclés possédant une plus petite pression d'entrée d'air, cela signifie que ce béton va dé-saturer plus rapidement en surface, ce qui crée une zone de faible perméabilité relative et donc un « bouchon » diminuant les flux d'eau entre la surface d'échange et l'intérieur de la structure, en comparaison avec le béton de granulats naturels qui verra cette zone apparaître plus tardivement. Cela est contraire aux résultats en conditions saturées, puisque dans ce cas, le coefficient de diffusion du RAC étant plus grand que celui du NAC, les résultats seraient inversés.

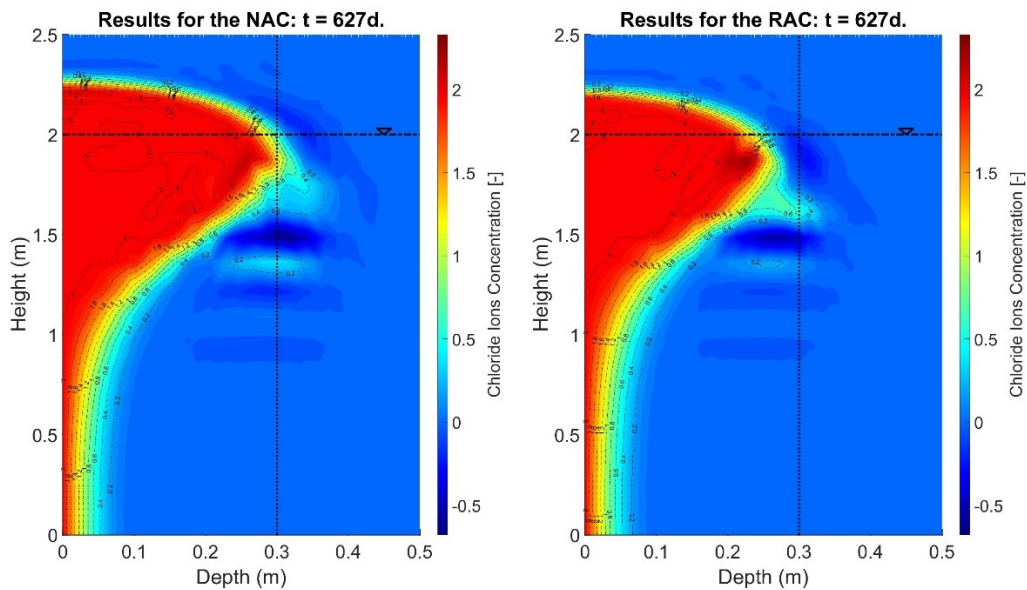


Figure 2 - Résultats de l'application : concentration en ions chlorure

6. CONCLUSION

Les phénomènes de transport d'eau et de polluant au sein du béton possiblement non-saturés sont importants. Les essais ont montré que, pour un béton, la substitution de granulats naturels par des granulats de béton recyclés augmente sa porosité, son absorption d'eau, sa perméabilité ainsi que ses coefficients de diffusion aux ions chlorure. Sa pression d'entrée d'air est, quant à elle, plus faible, ce qui indique des échanges plus précoces entre l'environnement et la structure poreuse.

Lorsque ces résultats sont introduits dans le modèle numérique, dans le cadre d'une application sur un mur de quai en partie immergé dans de l'eau salée, on remarque que les deux bétons se comportent de manière semblable, avec une concentration en chlorures qui tend à être supérieure dans le béton de granulats naturels plutôt que dans le béton de granulats recyclés. Cela est contre-intuitif mais peut-être dû à la courbe de rétention d'eau uniquement, la perméabilité relative étant plus faible dans le béton de granulats recyclés que dans le béton de granulats naturels, pour les mêmes conditions appliquées. Les granulats recyclés peuvent, d'autre part, augmenter la rétention de l'eau (et des ions) en raison de leur porosité élevée, et donc de leur surface spécifique augmentée.

D'autres simulations doivent être réalisées en faisant varier les paramètres des bétons afin de déterminer la sensibilité du modèle à ceux-ci. Néanmoins, les résultats sont plutôt prometteurs quant à la durabilité d'un béton de granulats recyclés vis-à-vis d'un béton de granulats naturels.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail est supporté financièrement par la Région Wallonne (Belgique) dans le cadre d'une bourse du Fonds National pour la Recherche dans l'Industrie et l'Agriculture (FRIA).

8. RÉFÉRENCES

- Arredondo-Rea, S. P.; Corral-Higuera, R.; Gómez-Soberón, J. M.; Castorena-González, J. H.; Orozco-Carmona, V. & Almaral-Sánchez, J. L. (2012), Carbonation Rate and Reinforcing Steel Corrosion of Concretes with Recycled Concrete Aggregates and Supplementary Cementing Materials, *International Journal of Electrochemical Science*, 7:1602-1610
- Bertrand, F.; Buzzi, O.; Bésuelle, P. & Collin, F. (2020), Hydro-mechanical modelling of multiphase flow in naturally fractured coalbed using a multiscale approach, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 78:103303
- Biver, P. (1993), *Phenomenal and Numerical study on the propagation of miscible pollutants in a medium with multiple porosity*, University of Liège (PhD. Thesis)
- Collin, F.; Li, X.; Radu, J. & Charlier, R. (2002), Thermo-hydro-mechanical coupling in clay barriers, *Engineering Geology*, 64:179-193
- Fanara, A.; Courard, L.; Collin, F. et Hubert, J. (2022), Transfer properties in recycled aggregates concrete: Experimental and numerical approaches, *Construction and Building Materials*, 326:126778
- Fanara, A.; Courard, L. & Collin, F. (2022b), FE2 multiscale modelling of chloride ions transport in recycled aggregates concrete, *Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures*, Taylor and Francis Group, 1:66-75
- Fanara, A.; Courard, L. & Collin, F. (2022c), Development of a FE2 Multiscale Model of Chloride Ions Transport in Recycled Aggregates Concrete, *ECCOMAS Congress 2022 - 8th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*
- Fanara, A., Courard, L., & Collin, F. (2023). Numerical and Experimental Study of Chloride Ion Transport in Recycled Aggregates Concrete. In *Special Issue - NoMaD 2022* (Vol. 40 No.2). *Academic Journal of Civil Engineering*.
- Fathifazl, G.; Razaqpur, A. G.; Isgor, O. B.; Abbas, A.; Fournier, B. et Foo, S. (2011), Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate, *Cement and Concrete Composites*, 33:1026-1037
- Garboczi, E. J. & Bentz, D. P. (1998), Multiscale Analytical/Numerical Theory of the Diffusivity of Concrete, *Advanced Cement Based Materials*, 8:77-88
- de Juan, M. S. et Gutiérrez, P. A. (2009), Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*, 23:872-877
- Kouznetsova, V.; Brekelmans, W. A. M. & Baaijens, F. P. T. (2001), An approach to micro-macro modeling of heterogeneous materials, *Computational Mechanics*, 27:37-48
- Levy, S. M. & Helene, P. (2004), Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, *Cement and Concrete Research*, 34:1975-1980
- Lovato, P. S.; Possan, E.; Molin, D. C. C. D.; Masuero, A. B. et Ribeiro, J. L. D. (2012), Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes, *Construction and Building Materials*, 26:437-447
- Mangat, P. S. et Molloy, B. T. (1994), Prediction of long term chloride concentration in concrete, *Materials and Structures*, 1994, 27:338-346
- Morga, M. et Marano, G. C. (2015), Chloride Penetration in Circular Concrete Columns, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9:173-183
- Nilenius, F. (2014), *Moisture and Chloride Transport in Concrete - Mesoscale Modelling and Computational Homogenization*, Chalmers University of Technology (PhD. Thesis)
- Patel, R. A. ; Janez, P. et Diederik, J. (2017), Multi-scale modeling strategies to improve durability models for service life predictions of concrete structures , *XIV DBMC - 14th International Conference on Durability of Building Materials and Components*, 309-310
- Pedro, D.; de Brito, J. et Evangelista, L. (2014), Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete, *Construction and Building Materials*, 71:141-151
- Pedro, D.; de Brito, J. et Evangelista, L. (2015), Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: influence of the crushing process, *Materials and Structures*, 48:3965-3978
- Van Genuchten, M. T. (1980), A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898
- Xi, Y. & Bazant, Z. P. (1999), Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11:58-65
- Zuquan, J.; Xia, Z.; Tiejun, Z. & Jianqing, L. (2018), Chloride ions transportation behavior and binding capacity of concrete exposed to different marine corrosion zones, *Construction and Building Materials*, 177:170-183