

MODÉLISATION DE LA PERMÉABILITÉ EN FONCTION DE LA MICROSTRUCTURE D'UN MATÉRIAU CIMENTAIRE

Fabien GENDRON*, Philippe TURCRY*, Jérôme LUX*,
Ameur HAMAMI*, Abdelkarim AÏT-MOKHTAR*

*Université de La Rochelle, LEPTIAB

1. INTRODUCTION

Tout comme les performances mécaniques des matériaux entrant dans la constitution d'une structure, la durabilité devient progressivement un des critères de dimensionnement de la structure. Ainsi, la formulation d'un béton donné doit intégrer, en plus de ses performances mécaniques et de mise en œuvre classiques, des critères de performances donnés dans la norme EN-206 en termes de classes d'exposition. Par ailleurs, la communauté des chercheurs et des professionnels du domaine a établi depuis une dizaine d'année des guides d'essais sur des paramètres de durabilité (AFGC, 1997) (Grandubé, 2007). C'est ainsi que la perméabilité du béton est définie au cours des travaux cités comme un des indicateurs de sa durabilité. Si l'on considère alors le transport d'agents agressifs, ce paramètre semble être plus fin que la porosité par exemple (Baroghel-Bouny, 2004). La pénétration d'éléments agressifs au sein du béton dépend de fait de sa structure porale. La mise au point de bétons peu perméables, a priori à durabilité élevée, passe donc par la compréhension et la modélisation de la relation entre microstructure et perméabilité.

A l'échelle macroscopique, l'écoulement d'un fluide dans un milieu cimentaire saturé peut généralement être décrit par la loi de Darcy. La perméabilité est alors définie formellement comme une propriété intrinsèque du matériau,

ne dépendant que des propriétés structurales de ce dernier (Whitaker, 1999).

La modélisation de la perméabilité des matériaux cimentaires est néanmoins une entreprise délicate, car leur microstructure est complexe et multi-échelle. Par conséquent, la perméabilité est souvent calculée à partir d'un nombre limité de paramètres structuraux identifiables expérimentalement, comme la porosité, ou la distribution des rayons d'accès des pores obtenue par porosimétrie au mercure. Des modèles de structures simplifiées renseignés par ces mesures, par exemple des réseaux de tubes cylindriques, peuvent également être utilisés pour des calculs prédictifs (Amiri *et al.*, 2005). Une autre approche consiste à générer une structure plus réaliste en simulant le processus d'hydratation de la pâte de ciment (Bentz *et al.* 1994, Navi *et al.*, 1996, Van Breugel, 1991). La perméabilité de cette microstructure virtuelle peut être ensuite obtenue par calcul (Bentz, 2008, Pignat *et al.* 2005, Van Breugel *et al.*, 2006). Une dernière approche utilise les moyens d'imagerie pour accéder à la structure réelle du matériau. Les développements récents de la tomographie aux rayons X permettent par exemple d'obtenir des images tridimensionnelles de la répartition des phases d'un matériau (Koster *et al.*, 2006, Burlion *et al.*, 2006). Cela étant, la tomographie est encore limitée à des résolutions de l'ordre du micron et ne permet donc pas de couvrir les petites échelles de porosité rencontrées dans les matériaux cimentaires.

Dans cet article, nous nous proposons d'étudier les capacités prédictives de la perméabilité de deux approches de modélisation de la microstructure d'une pâte de ciment. La première est basée sur le modèle d'hydratation développé par le NIST (Bentz et al. 1994), la seconde sur la génération de réseaux de capillaires équivalents. Une campagne de caractérisation expérimentale de trois pâtes de ciment de rapports E/C différents est présentée dans une première partie. L'objectif de cette campagne est d'identifier les paramètres d'entrée des modèles utilisés et de disposer de valeurs de perméabilité expérimentales de référence. Les méthodes numériques de calcul de perméabilité, associées à chacun des deux modèles de microstructure, sont ensuite explicitées. La comparaison entre les perméabilités expérimentales et calculées numériquement nous permet finalement de discuter de la pertinence des modèles structuraux et de leurs limitations respectives.

2. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Le ciment utilisé est un CEM-I 52,2 de l'usine Vicat de Montalieu. Ce ciment a été choisi parce qu'il fait partie de la base de données de l'application CemHyd3D du NIST. Trois pâtes de ciment ont été testées, de rapports E/C égaux à 0,33, 0,42 et 0,5. 24 heures après fabrication, les pâtes ont été démoulées pour être conservées dans l'eau jusqu'aux essais.

2.1. Degré d'hydratation

L'évolution dans le temps du degré d'hydratation maturité des pâtes a été déterminée par analyse thermogravimétrique (ATG) réalisée sur des échantillons de pâtes broyées de masse de l'ordre de 50mg. Le degré d'hydratation est défini ici comme la quantité d'eau liée à l'instant de mesure, déduite des essais d'ATG, rapportée à la quantité d'eau liée pour une hydratation complète, calculée à partir des formules de Bogue et de la composition chimique du ciment. Les courbes d'hydratation des trois matériaux sont présentées sur la Figure 1. On note que le rapport E/C a peu d'influence sur le degré d'hydratation sur la période étudiée.

2.2. Porosité

La porosité est le paramètre structural le plus simple à mesurer et dont dépend fortement la perméabilité des matériaux cimentaires. Le tableau 1 synthétise les résultats obtenus après 3 mois de conservation sous eau, par porosimétrie à l'eau, en suivant la procédure AFREM (AFGC-AFREM, 1997) et par porosimétrie au mercure. Comme attendu, la porosité augmente avec le rapport E/C.

2.3. Perméabilité au gaz

Après conservation pendant 3 mois dans l'eau, la perméabilité des pâtes a été mesurée à l'aide d'un perméamètre à air. Les échantillons testés ont été séchés au préalable dans une étuve ventilée à la température de 80°C jusqu'à stabi-

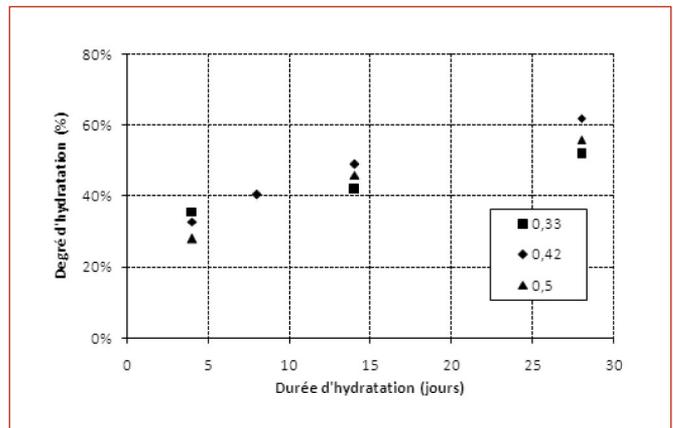


Figure 1. Evolution du degré d'hydratation en fonction du temps.

Rapport E/C	Porosité	
	mesurée à l'eau	mesurée au mercure
0,33	25%	20%
0,42	32%	26%
0,50	39%	32%

Tableau 1. Porosité des pâtes de ciment à l'âge de 3 mois.

lisation de leur masse. Ce préconditionnement a été préféré à un séchage à 105°C, permettant certes d'obtenir une teneur en eau quasi-nulle mais risquant d'endommager la microstructure du matériau.

La mesure de la perméabilité est réalisée en régime instationnaire. Cette méthode consiste à imposer une pression constante, supérieure à 100 kPa, en amont d'un échantillon cylindrique et à mesurer l'évolution de la pression dans une chambre en aval, dans laquelle un « vide » primaire aura été créé au préalable. L'écoulement du gaz s'effectue dans une seule direction grâce à une étanchéité radiale assurée par une résine adaptée. Au cours de l'essai, la pression en aval évolue linéairement avec le temps, parce que le gradient de pression est très élevé. La pente de cette droite est utilisée comme donnée pour calculer la perméabilité K du matériau, par application de la loi de Darcy et en supposant le gaz parfait. La perméabilité ainsi calculée n'est qu'une perméabilité apparente, car la perméabilité au gaz d'un matériau poreux dépend de la différence de pression moyenne entre amont et aval, en raison de l'effet Klinkenberg qui rend compte du phénomène de glissement du gaz sur les parois des pores. Dans notre étude, la perméabilité intrinsèque est déduite de trois perméabilités apparentes mesurées pour des pressions en amont de 160, 185 et 210 kPa, avec la méthode développée par (Klinkenberg, 1941).

Les échantillons testés sont des cylindres de 65 mm de diamètre et de 50 mm d'épaisseur obtenus par sciage et carottage. Trois essais ont été réalisés pour chacune des pâtes de ciment. Les résultats ainsi que les écarts-types sont présentés dans le tableau 2. Ces résultats s'accordent avec ceux de la littérature et sont cohérents avec ceux sur la porosité, car la perméabilité augmente bien avec le rapport E/C.

Rapport E/C	Perméabilité intrinsèque	
	Moyenne	Ecart-type relatif
0,33	$1,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	14 %
0,42	$1,3 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	14 %
0,50	$2,0 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	16 %

Tableau 2. Perméabilités intrinsèques obtenues au perméamètre au gaz après 3 mois de conservation dans l'eau.

3. PRÉDICTION DE LA PERMÉABILITÉ À PARTIR D'UNE MICROSTRUCTURE CALCULÉE

Le premier modèle de microstructure considéré s'appuie sur une approche numérique de la génération d'un matériau cimentaire à partir de son hydratation (Bentz et al., 1994).

3.1. La suite logicielle CemHyd3D

CemHyd3D est un logiciel mis au point par (Bentz et al., 1994) au National Institute of Standard and Technology (NIST). En libre téléchargement, la version 3 du logiciel en plusieurs sous programmes permet de simuler l'hydratation des pâtes de ciment. Dans un premier temps, un empilement aléatoire de grains sphériques de ciment est généré à partir de la granulométrie et de la composition chimique du ciment et du rapport E/C souhaité, qui conditionne la compacité initiale de l'empilement. Le résultat de cette génération est une image en 3 dimensions, par défaut de 100 pixels de côté. L'échelle, également par défaut du logiciel, est de $1 \mu\text{m}$ par pixel. Dans un second temps, le processus d'hydratation de l'empilement de grains anhydres est simulé. L'hydratation est modélisée par des cycles de dissolution – diffusion – précipitation. Ces phénomènes sont générés pixel par pixel. Par exemple, un pixel de C3S, principal composé du ciment anhydre, se « dissout » s'il est en contact avec un pixel poreux. Il diffuse ensuite aléatoirement dans la porosité et précipite sous la forme de pixels de CSH et de CH, les deux principaux hydrates du ciment. La modélisation prend en compte la stoechiométrie de la réaction de l'anhydre avec l'eau mais également le bilan volumique des réactions. Dans le même exemple, un pixel de C3S doit précipiter entre 1,5 pixels de CSH et 0,6 de CH.

Le logiciel CemHyd3D prend en compte beaucoup de paramètres affectant l'hydratation. Citons par exemple la température de l'échantillon et les conditions de saturation en eau. Le résultat des simulations nous intéressant ici est la génération d'une image « voxelisée » en 3D représentant un échantillon de pâte de ciment hydraté. Par comparaison d'une image calculée avec une image réelle obtenue par tomographie, les auteurs de CemHyd3D montrent à l'aide de fonctions de corrélation que la microstructure simulée est réaliste dans le sens où l'image calculée et l'image réelle possèdent les mêmes

distributions spatiales de leurs constituants (hydrates, anhydres, vides).

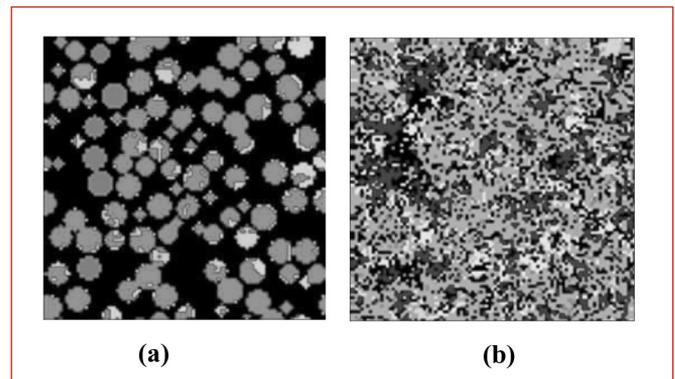


Figure 2. Coupe 2D d'un échantillon de pâte de ciment généré à l'aide de CemHyd3D, avant (a) et après (b) hydratation. Les principales couleurs correspondent aux éléments suivants : noir = porosité ; rouge = C3S ; bleu clair = C2S ; gris = gypse ; vert = C3A ; orange = CSH ; bleu foncé = CH.

3.2. Ajustement du coefficient de la cinétique d'hydratation dans CemHyd3D

Pour modéliser l'hydratation d'un ciment donné, l'ajustement d'un paramètre empirique β est nécessaire. Il gouverne la relation entre la durée réelle d'hydratation et le nombre de cycles de dissolution – diffusion – précipitation du modèle. Cet ajustement est réalisé en calant l'évolution temporelle de l'hydratation issue des simulations réalisées avec CemHyd3D sur l'évolution mesurée à l'ATG sur nos différents échantillons. Pour réaliser nos simulations, les données utilisées concernant le ciment de Montalieu sont : répartition granulométrique, composition chimique et répartition spatiale des éléments chimiques (issue d'une image MEB du ciment étudié disponible dans la base de données du NIST).

Rapport E/C	Coefficient cinétique β
0,33	0,0014
0,42	0,0020
0,50	0,0022

Tableau 3. Coefficients cinétiques d'hydratation déterminés par calage à partir des données d'ATG.

La figure 3 donne un exemple de l'évolution du degré d'hydratation calculée pour un coefficient β donné et l'évolution mesurée. Notons que le coefficient β ainsi déterminé dépend, pour un même ciment, du rapport E/C (Tableau 3).

3.3. Génération des images 3D

Pour chaque rapport E/C, une image de taille 100^3 voxels et de résolution $1 \mu\text{m}$ par voxel est générée grâce aux paramètres identifiés précédemment.

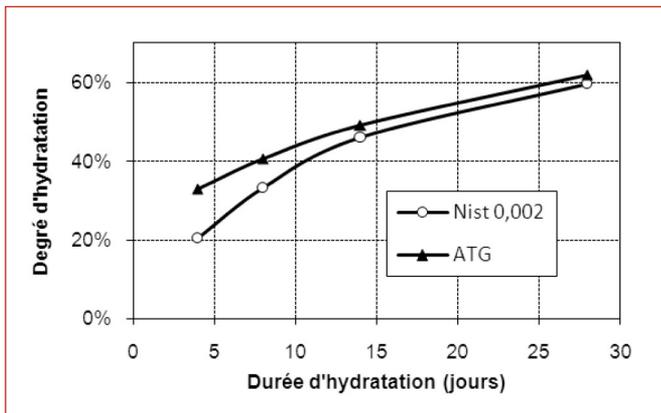


Figure 3. Evolution du degré d'hydratation de la pâte de ciment à $E/C=0,33$, obtenu par simulation CemHyd3D pour $\beta=0,002$ comparée aux résultats des essais d'ATG.

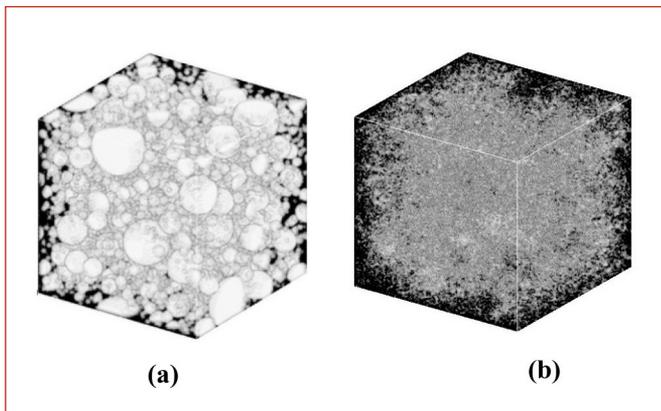


Figure 4. Image 3D de la microstructure : (a) avant hydratation où les grains sont en blancs, (b) après hydratation où l'on a inversé l'image pour plus de lisibilité et où les pores sont en blanc.

La Figure 4 donne un exemple de l'image de la structure avant et après hydratation. Compte tenu de la granulométrie du ciment de Montalieu, les dimensions sont a priori suffisantes pour que le volume soit représentatif d'un arrangement de ce type de grains.

3.4. Calcul de la perméabilité par résolution des équations de Stokes

La perméabilité des pâtes de ciment numériques peut être calculée directement à partir des images 3D en simulant l'écoulement d'un fluide au sein de l'espace poral. Compte tenu des échelles de porosité dans les milieux cimentaires, on suppose généralement que les écoulements sont à faible Reynolds. Dans le cas d'un fluide incompressible, l'écoulement stationnaire est donc gouverné par les équations de Stokes où μ est la viscosité dynamique, V et P la vitesse et la pression dans le fluide :

$$\begin{cases} \mu \Delta \vec{V} = \text{grad} P \\ \text{div} \vec{V} = 0 \end{cases} \quad [1]$$

La méthode de résolution choisie se base sur une discrétisation de type volumes finis, qui a l'avantage de correspondre exactement à la discrétisation de la géométrie de la structure, évitant ainsi un remaillage complet et coûteux de

l'image. Un maillage décalé pour la vitesse et la pression est utilisé afin d'obtenir un schéma naturellement stable. Le couplage des équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement est réalisé par l'algorithme itératif classique SIMPLE (Patankar, 1983). Un algorithme de gradient conjugué est utilisé pour la résolution des systèmes linéaires obtenus à chaque itération de SIMPLE. Les simulations numériques réalisées visent à reproduire une expérience de mesure de perméabilité unidirectionnelle. Par conséquent, les conditions aux limites imposées sont des pressions constantes différentes sur les faces amont et aval (sens de l'écoulement) ainsi que des conditions d'imperméabilité sur les autres faces (vitesse nulle). La perméabilité au sens de la loi de Darcy est déterminée par identification à partir du débit du fluide au travers de l'image.

Rapport E/C	Perméabilité intrinsèque	
	Moyenne	Ecart-type relatif
0,33	$4,9 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	8 %
0,42	$17,5 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	9 %
0,50	$104,2 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$	9 %

Tableau 4. Perméabilités intrinsèques obtenues pour les microstructures issues de CemHyd3D.

Les résultats de perméabilités déterminées sur 5 réalisations de chaque pâte de ciment sont présentés dans le tableau 4. La figure 5 montre un exemple de visualisation des champs de vitesse et de pression obtenus sur une image 3D.

4. MODÈLE DE RÉSEAU DE CAPILLAIRES

Le second modèle de microstructure est basé sur la simplification de l'espace poral en un réseau de capillaires dont certains paramètres proviennent directement de l'interprétation de mesures expérimentales. La génération de réseau de pores se voulant réalistes constitue encore un domaine d'étude dynamique. Actuellement, de nombreuses méthodes se basent sur l'analyse d'images tomographiques (Le Trong, 2005, Prodanovic, 2006, Al-Kharusi, 2007). Cependant, l'aspect multi-échelle de la porosité des matériaux cimentaires limite fortement la portée de cette approche. Dans d'autres modèles (Amiri et al., 2005), le réseau de capillaires est généré à partir de mesures de porosimétrie par intrusion de mercure. C'est ce type d'approche qui est choisie dans ce travail.

4.1. Génération du réseau

Le réseau est constitué de capillaires droits dont chaque extrémité est connectée à 5 autres capillaires (6-connectivité). Le choix de cette connectivité est ici tout à fait arbitraire, même si pour d'autres types de matériaux (Al-Kharusi, 2007) la connectivité moyenne est proche de

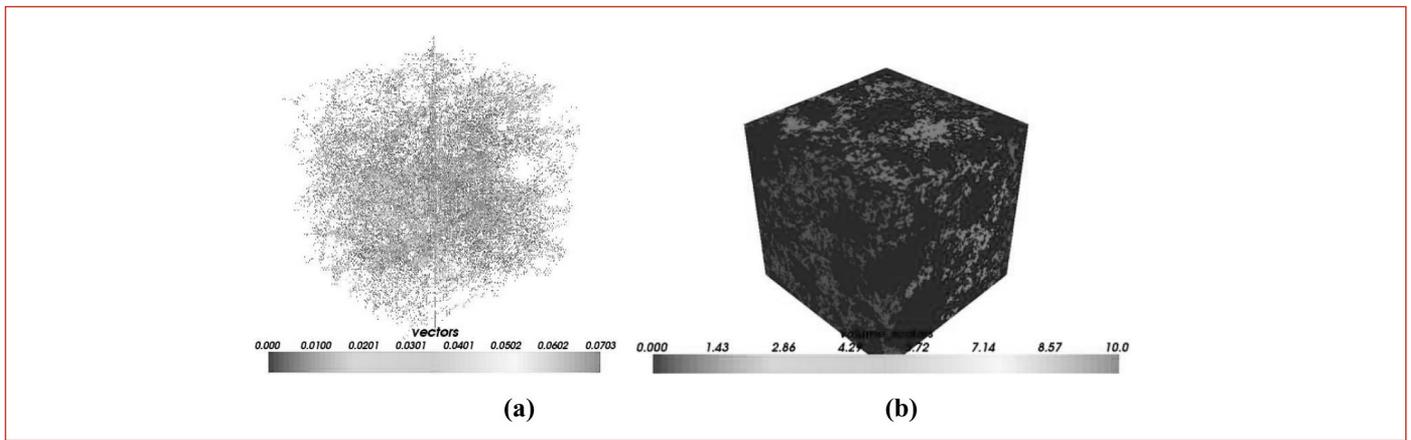


Figure 5. Champ de vitesse (a) et de pression (b) dans l'image 3D.

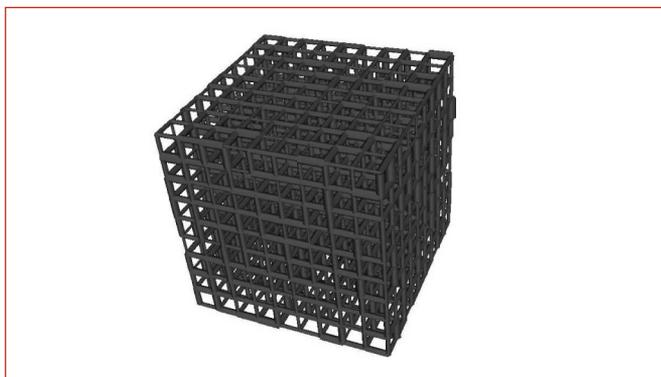


Figure 6. Exemple d'une distribution d'un réseau de capillaires cubique 10x10x10.

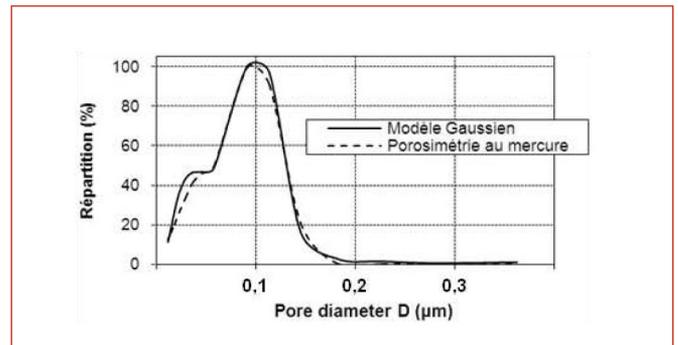


Figure 8. Calage d'une distribution bimodale gaussienne pour la pâte E/C=0,50.

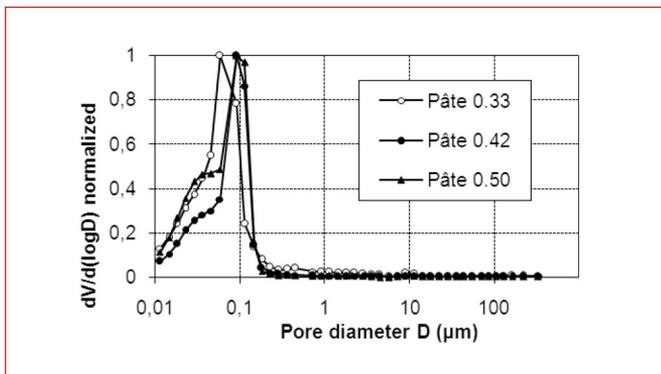


Figure 7. Distribution porale obtenue au porosimètre à mercure pour les 3 pâtes de ciment étudiées.

6. Les dimensions des capillaires, ainsi que la taille du volume cubique les contenant, sont imposées de manière à conserver, d'une part, la porosité et, d'autre part, à reproduire la distribution des rayons d'accès obtenue par porosimétrie au mercure (Figure 6).

Ces distributions sont modélisées par des distributions gaussiennes uni- ou bi-modales dont les paramètres sont tirés de l'analyse des courbes expérimentales de porosimétrie (Figures 7 et 8). La génération se fait en plaçant aléatoirement les capillaires dans le réseau, tout en respectant la distribution de la pâte simulée.

4.2. Calcul de la perméabilité

De même que précédemment, les conditions aux limites sont choisies de telle manière à reproduire les conditions

de mesures expérimentales. Une différence de pression constante est ainsi appliquée entre les faces amont et aval du réseau et les autres faces sont supposées imperméables. Chaque capillaire est défini par ses nœuds amont et aval. Le débit Q dans un capillaire de rayon R et longueur L est donné par la loi de Hagen-Poiseuille en fonction de la différence de pression ΔP aux bornes et de la viscosité μ du fluide :

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8L \mu} \quad [2]$$

L'application de la conservation de la masse en chaque nœud du réseau permet d'obtenir un système linéaire dont la résolution donne les pressions en chaque nœud. La perméabilité intrinsèque est ensuite déterminée à l'aide de la loi de Darcy, en calculant la vitesse moyenne du fluide en aval du cube contenant le réseau ramenée au gradient de pression entre amont et aval.

Les résultats pour 10 essais pour chaque pâte de ciment, ainsi que les écarts-types associés, sont présentés dans le Tableau 5.

5. DISCUSSION

Le tableau 6 synthétise l'ensemble des résultats numériques et expérimentaux obtenus sur la perméabilité. On remarque tout d'abord que la méthode de calcul basée sur les réseaux de capillaires permet d'approcher la per-

Rapport E/C	Perméabilité intrinsèque	
	Moyenne	Ecart-type relatif
0,33	0,43 10^{-16} m ²	4 %
0,42	1,05 10^{-16} m ²	6 %
0,50	1,11 10^{-16} m ²	5 %

Tableau 5. Perméabilités intrinsèques obtenues pour les réseaux de capillaires.

méabilité expérimentale quel que soit le rapport E/C. Comme on peut s'y attendre, les valeurs sont néanmoins systématiquement sous-estimées. En effet, la porosimétrie au mercure ne permet d'accéder qu'à une distribution des rayons d'accès des pores (effet « bouteille d'encre »), sous-estimant de fait le poids des pores de plus grandes tailles. Il est probable que l'approche par réseau de pores montre ses limites dans le cas de matériaux présentant une plus large gamme de tailles de pores (mortier, béton). Notons aussi que la sous-estimation des rayons des pores est contrebalancée par l'absence de tortuosité dans nos réseaux, dont l'influence reste à quantifier et par le fait que la connectivité des réseaux est sans doute plus grande que dans la microstructure réelle.

Les résultats des simulations directes sur les pâtes de ciment numériques montrent quant à eux une surestimation systématique, dont l'amplitude augmente de manière notable avec le rapport E/C, pour atteindre deux ordres de grandeurs. A ce titre, seule la perméabilité calculée pour un E/C de 0,33 est du même ordre de grandeur que la valeur expérimentale. Nos résultats sont similaires à ceux d'une étude antérieure traitant de l'influence de la résolution sur l'estimation des propriétés de transport à partir de CemHyd3D (Garboczi et Bentz, 2001). Il est en effet clair que si la microstructure pixélisée générée par CemHyd3D permet d'approcher la géométrie complexe de la microstructure réelle, le choix d'une résolution de 1 μ m ne permet pas de résoudre le principal mode poreux détecté expérimentalement, qui se situe autour de 0,1 μ m. La perméabilité étant en partie liée au carré du rayon des pores, elle est donc fortement surestimée lorsque seuls les pores les plus gros sont considérés. Garboczi et Bentz ont également montré que, pour de faibles porosités, une résolution

de 1 μ m engendre des problèmes de connectivité, diminuant de manière significative la porosité percolante et donc la perméabilité. Ces effets liés à la discrétisation sont illustrés dans le tableau 7 où les différentes porosités des pâtes numériques (totale, ouverte, percolante) sont comparées aux valeurs expérimentales. Nos résultats montrent une sous-estimation importante des porosités utiles dans les pâtes de ciment générées. Il est à noter que la solution la plus simple consistant à augmenter la résolution se heurte à d'autres problèmes liés au modèle même de CemHyd3D, discutés ailleurs (Garboczi et Bentz, 2001). L'empilement des grains de ciment anhydres est, par exemple, construit à partir d'une image MEB de résolution de 0,5 μ m par pixel. Cette valeur est donc une limite « naturelle » pour la résolution de CemHyd3D.

Il est à rappeler que les perméabilités mesurées ne sont que des estimations de la perméabilité réelle des pâtes. En effet, un séchage à 80°C ne garantit pas l'obtention d'un degré de saturation nul; or la perméabilité au gaz est très affectée par la saturation en eau. En revanche, un préconditionnement en étuve à une température plus élevée, par exemple 105°C, engendrerait inévitablement une destruction de certains hydrates (ettringite par exemple) et une microfissuration de l'échantillon. L'endommagement d'un béton affecte aussi sa perméabilité (Picandet et al, 2001).

6. CONCLUSION

D'un point de vue technologique, nous avons vu à travers les exemples de calcul de perméabilité que la valeur obtenue pour ce paramètre dépend dans une certaine mesure du modèle de géométrie de la structure adopté. Il reste que les résultats de ces modèles peuvent d'ores et déjà être exploités et intégrés dans des codes de calcul prédictifs du comportement de la structure en service. Car les écarts constatés semblent acceptables au regard des incertitudes et variabilités observées déjà sur les paramètres des propriétés mécaniques et de transfert caractérisant des bétons de chantier ou prêts à l'emploi (APPLET, 2009). Sous cet angle, l'outil fourni au cours de cette étude semble satisfaisant pour une utilisation par l'ingénieur.

Rapport E/C	Perméabilité intrinsèque ($\times 10^{-16}$ m ²)		
	Expérimentale	Modèle de réseau de capillaires	Modèle CemHyd3D
0,33	1,0	0,43	4,9
0,42	1,3	1,05	17,5
0,50	2,0	1,11	104,2

Tableau 6. Comparaison des perméabilités mesurées et des perméabilités calculées.

Tableau 7. Comparaison des porosités mesurées et calculées. La porosité percolante rassemble les pores reliant l'amont et l'aval de l'échantillon.

Rapport E/C	Porosités expérimentales (%)		Porosités calculées à partir du modèle CemHyd3D (%)			
	mesurée à l'eau	mesurée au mercure	Porosité totale	Porosité ouverte	Porosité fermée	Porosité percolante
0,33	25	20	24,6	17,2	7,4	15,1
0,42	32	26	29,1	23,4	5,7	22,1
0,50	39	32	38,3	35,6	2,7	35,2

D'un point de vue scientifique, notre étude comparative met en évidence la question fondamentale de la capacité des modèles, en particulier des deux proposés ici, à représenter correctement la géométrie de la microstructure des matériaux cimentaires, notamment des différentes échelles de leur porosité. Il semble donc important d'appréhender leur aspect multi-échelles, notamment si l'on veut s'intéresser à la microstructure des mortiers puis des bétons. Une des voies, pour rendre les modèles de microstructure plus performants, pourrait être de combiner différentes méthodes d'investigation expérimentales et exploiter ainsi la complémentarité de leurs données. Il s'agit principalement de la porosimétrie au mercure, du MEB et de la tomographie.

7. RÉFÉRENCES

- AFPC-AFREM, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité », *Comptes-rendus des journées techniques, Toulouse*, 1997.
- APPLET – Durée de vie des ouvrages : Approche prédictive, performantielle et probabiliste, Projet ANR-RGCU, 2005-2007.
- GRANDUBE – Grandeurs associées à la durabilité des bétons, sous la direction de G. Arliguie et H. Hornain, Ed. De l'ENPC, 2007.
- Al-Kharusi A.S., Blunt M.J., « Network extraction from sandstone and carbonate pore space », *Journal of Petroleum Science and Engineering* 56 (2007) 219 – 231
- Amiri O., Ait-Mokhtar A. and Sarhani M., « Tri-dimensional modeling of cementitious materials permeability from polymodal pore size distribution obtained by mercury intrusion porosimetry tests », *Advances in Cement Research*, vol. 17, 2005, p. 39-45.
- Baroghel-Bouny V.(sous la direction de), « Guide AFGC. Conception des bétons pour une durée de vie données des ouvrages », *Documents Scientifiques et Techniques de l'Association Française de Génie Civil*, 2004.
- Bentz D.P., Coveney P.V., Garboczi E.J., Kleyn M.F., Stutzman P.E., « Cellular automaton simulations of cement hydration and microstructure development », *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, vol. 2, 1994, pp. 783-808.
- Bentz D.P., « Quantitative comparison of real and CEM-HYD3D model microstructures using correlation functions », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, 2006, pp. 259-263.
- Bentz D.P. « Virtual pervious Concrete: microstructure, percolation and permeability », *ACI Materials Journal*, vol. 105, 2008, pp. 297-301.
- Burlion N., Bernard D., Chen D. « X-ray microtomography: application to microstructure analysis of a cementitious material during leaching process », *Cement and Concrete Research*, vol. 36, 2006, pp. 346-357.
- Garboczi E.J., Bentz D.P., « The effect of statistical fluctuation, finite size error, and digital resolution on the phase percolation and transport properties of the NIST cement hydration model », *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, pp. 1501-1514.
- Klinkenberg L.J., The permeability of porous media to liquids and gases, Drilling and Production Practice, American Petroleum Institute, 1941.
- Koster M., Brameshuber W. and Hannawald J., « Simulation of water permeability and water diffusion through hardened cement paste », *Comput. Mech.*, vol. 37, 2006, p. 163-172.
- Le Trong E., Anguy Y., Simplification d'images 3D de matériaux poreux en vue de leur caractérisation physique, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 9, 2005, pp. 353-372.
- Navi P., Pignat C., « Simulation of cement hydration and the connectivity of the capillary pore space », *Advanced Cement Based Materials*, vol. 4, 1996, pp. 58-67.
- Patankar S.V., *Numerical Heat transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation – Taylor & Francis Group. New York, USA, 1983.
- Picandet V., Khelidj A., Bastian G., « Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high performance concrete », *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, 2001, pp. 1525-1533.
- Pignat C., Navi P., Scrivener K., « Simulation of cement paste microstructure hydration, pore space characterization and permeability determination », *Materials and Structures*, vol. 38, 2005, pp. 459-466.
- Prodanovic M., Lindquist W.B, Seright R.S., Porous structure and fluid partitioning in polyethylene cores from 3D X-ray microtomographic imaging, *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 298, 2006, pp. 282-297.
- Van Breugel K., « Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials », PhD Thesis, *Delft University, Netherlands*, 1991.
- Van Breugel K., Ye G., Lura P., « Modeling of water permeability in cementitious materials », *Materials and Structures*, vol. 39, 2006, p. 877-885.
- Whitaker S., *The method of volume averaging*, Kluwer Academic Press, 1999.