

**UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAÏD DE TLEMCEM
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

THÈSE

présentée en vue d'obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR

en

Génie Civil

Option : Matériau béton

Par

Zine El Abidine KAMECHE

Titre de la thèse

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE LA PERMÉABILITE RELATIVE AU
GAZ ET À L'EAU LIQUIDE DU BÉTON ORDINAIRE PARTIELLEMENT
SATURÉ.**

Soutenue le 16/12/2015 devant le jury d'examen :

Président :	M. Nabil ABOU-BEKR	Pr., Univ. de Tlemcen
Directeur de thèse :	M. Fouad GHOMARI	Pr., Univ. de Tlemcen
Co-directeur de thèse :	M. Abdelhafid KHELIDJ	Pr., Univ. de Nantes
Examineur :	M. Abdelkarim AÏT MOKHTAR	Pr., Univ. de La Rochelle
Examineur :	M. Mohamed Nadjib OUDJIT	Pr., USTHB d'Alger
Invité:	M. Mohamed MOULI	Pr., ENP Oran

Remerciements

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche (Projet TASSILI (10MDU811)), intitulé ; Durabilité et vieillissement du matériau béton, maintenance et réhabilitation des ouvrages sur le littoral. Ce projet est en coopération Algéro-Française (entre l'Université de Tlemcen et l'Université de Nantes). Il a été réalisé au sein de laboratoire EOLE (Eau et ouvrages dans leurs environnements) à l'Université de Tlemcen et de laboratoire GeM (Génie civil et mécanique) à l'IUT de St-Nazaire.

Je tiens alors à remercier le soutien financier du Projet TASSILI, qui a permis la réalisation de ce travail. Nos remerciements vont également aux laboratoires GeM (France) et EOLE (Algérie) pour leur soutien.

C'est sous la direction des Professeurs Fouad Ghomari et Abdelhafid Khelidj que cette recherche a été conduite. Je leur exprime mes sincères remerciements pour leur humanité et leur enthousiasme, de m'avoir aidé et accompagné au cours des années de thèse, et surtout fait confiance, pour des choix pas toujours faciles. Leurs présences et leurs encouragements m'ont aidé plus d'une fois à relever la tête dans les moments difficiles,

Je tiens à remercier tout particulièrement Madame Marta Choinska, qui m'a accompagnée tout au long de ces années, de m'avoir fait confiance, puis de m'avoir conseillé, guidé, aidé et encouragé, grâce à sa compétence, à son expérience et à sa vision aiguisée de la problématique traitée,

Je tiens à exprimer toute ma gratitude aux examinateurs; Professeur Mohammed Nadjib Oudjit et Professeur Abdelkrim Aït Mokhtar pour leur lecture attentive de ce mémoire.

Merci au Professeur Nabil Abou-Bekr d'avoir accepté de présider le jury,

Merci aux membres du groupe de suivi de la thèse : Stéphanie Bonnet, Abdellllah Bezzar, Nordine Leklou, Sidi Mohammed El Amine Boukli Hacène, et à tous ceux qui sont venus à nos réunions, pour leur participation et leurs remarques toujours constructives,

Je ne voudrais pas oublier de remercier également mes coéquipiers à l'Université de Tlemcen: Brahim Touil, Mohammed Hassoune, Sofiane Bellifa, Mustapha Guellil, et tous les techniciens du laboratoire de génie civil ayant participé au bon déroulement de ces travaux sur le plan expérimental. Ainsi que mes coéquipiers à l'IUT de St-Nazaire: Zinati Fateh, Roger Couhé, Aurélie Fabien, et toute l'équipe d'enseignants et de chercheurs du département Génie Civil de l'IUT de St-Nazaire à qui j'exprime reconnaissance et amitié pour leur soutien et pour la motivation qu'ils ont su m'apporter dans une ambiance conviviale.

Résumé :

Les perméabilités aux gaz et à l'eau liquide des bétons sont des indicateurs majeurs de la durabilité des ouvrages en béton armé, car elles régissent la pénétration d'agents agressifs gazeux ou liquides dans le béton. Toutefois, l'aptitude du béton à se faire pénétrer par des agents agressifs varie de façon sensible en fonction du taux d'humidité (degré de saturation) qui peut évoluer dans le temps et selon le milieu environnant. Le taux de saturation joue donc un rôle fondamental vis-à-vis des propriétés de transport au sein des bétons partiellement saturés.

Ce travail de recherche à caractère expérimental étudie les perméabilités au gaz et à l'eau liquide de bétons ordinaires partiellement saturés et vérifie la validation de certains modèles existants (développés à l'origine pour les sols) pour la prédiction de la perméabilité relative du béton en fonction de son degré de saturation. Des relations empiriques entre la perméabilité intrinsèque au gaz et le degré de saturation ont été déterminées pour chacun des quatre bétons ordinaires étudiés, ainsi que l'évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation a été déduite pour ces bétons. L'influence de certains paramètres, tels que le préconditionnement, et des paramètres de formulation comme le rapport E/C et la classe de résistance du ciment, sur la microstructure du béton et par conséquent sur sa perméabilité relative au gaz, a été déterminée. Aussi, l'effet de la taille de l'échantillon (diamètre de l'échantillon) sur la mesure de la perméabilité au gaz n'est pas très significatif.

Une méthode de mesure de la perméabilité relative à l'eau liquide a été proposée, dans ce travail, pour caractériser la perméabilité du béton partiellement saturé en régime non stationnaire. Pour chaque béton étudié, une relation exponentielle entre la perméabilité intrinsèque à l'eau liquide et le degré de saturation a été déterminée. La perméabilité intrinsèque a été aussi calculée par le modèle de Katz-Thompson II, basée sur les résultats de la porosimétrie au mercure et comparée avec celle mesurée expérimentalement pour les quatre bétons étudiés.

La validité des modèles existants dans la littérature pour l'évaluation de la perméabilité relative des milieux poreux non saturés a été vérifiée pour les bétons ordinaires étudiés. Un ajustement est proposé pour la modélisation de la courbe de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation en utilisant le modèle de Van Genuchten-Mualem. La perméabilité relative à l'eau en fonction du degré de saturation peut être modélisée par le modèle de DiCarlo modifié.

Mots clés : Durabilité, Béton, Perméabilité relative, Degré de saturation, Effet d'échelle.

Summary:

The gas and the liquid water permeabilities of concrete are major indicators of durability of reinforced concrete structures, because they regulate the penetration of aggressive agents gaseous or liquids in the concrete. However, the ability of the concrete to be penetrated by aggressive agents varies significantly depending on the moisture content (degree of saturation), which can change over time and depending on the surrounding environment. The saturation rate plays thus a fundamental role on the transport properties within the partially saturated concrete.

This research work with experimental nature studies the gas and the liquid water permeabilities of partially saturated ordinary concretes and verifies the validation of some existing models (originally developed for soils) for predicting the relative permeability of concrete according to its degree of saturation. Empirical relationships between the intrinsic gas permeability and the saturation degree were determined for each of the four ordinary concretes studied, well as the evolution of the relative permeability depending on the gas saturation was deduced for these concretes. The influence of certain parameters such as the preconditioning, and formulation parameters as the W/C ratio and cement strength class, on the microstructure of concrete and consequently on its relative gas permeability, was determined. Also, the effect of the sample size (sample diameter) on the gas permeability measurement is not very significant.

A method for measuring the relative permeability to liquid water has been proposed, in this work, to characterize the permeability of partially saturated concrete in non-stationary regime. For each concrete studied, an exponential relationship between the intrinsic permeability to liquid water and the degree of saturation was determined. The intrinsic permeability was also calculated by the model of Katz-Thompson II, based on the results of mercury porosimetry and compared with that measured experimentally for all four concretes.

The validity of existing models in the literature for the evaluation of the relative permeability of non-saturated porous media has been verified for ordinary concretes studied. An adjustment is provided for modeling the curve of the relative gas permeability depending on the saturation using the model of Van Genuchten-Mualem. The relative water permeability according to the saturation degree can be modeled by the modified DiCarlo model.

Keywords: *Durability, Concrete, Relative permeability, Saturation degree, Scale effect.*

ملخص:

إنّ نفاذية الخرسانة للغاز و الماء السائل هي مؤشرات رئيسية لديمومة الخرسانة المسلحة، إذ أنّها تتحكّم في تغلغل العناصر الضارة، الغازية أو السائلة، داخل الخرسانة. في حين أنّ قابلية الخرسانة بالسّمح لهذه العناصر باختراقها، تتغيّر بشكل واضح حسب مستوى الرطوبة فيها (درجة التشبع)، والتي يمكن أن تتغيّر مع مرور الوقت، واعتمادا على البيئة المحيطة. بالتالي فإن معدل التشبع يلعب دورا أساسيا في التأثير على خصائص انتقال السوائل في الخرسانة المشبعة جزئيا.

إنّ هذا البحث التجريبي يهتم بدراسة نفاذية الغاز والماء السائل في الخرسانة العادية المشبعة جزئيا ويعمل على التحقق من صحة بعض النماذج الحالية (الموضوعة أصلا لأجل التربة) للنتبؤ بالنفاذية النسبية للخرسانة وفقا لدرجة تشبعه من الماء. العلاقات التجريبية بين النفاذية الجوهرية للغاز ودرجة التشبع لكل من الخرسانات العادية الأربعة المدروسة تمّ تحديدها. وأيضا تطوّر النفاذية النسبية للغاز حسب درجة التشبع لهذه الخرسانات تمّ استنتاجها. تأثير بعض العوامل مثل الشروط المسبقة لتحضير العينات، ومتغيرات التركيبة الخرسانية كنسبة الماء إلى الإسمنت ومقاومة الإسمنت تحت تأثير الضغط، قد تمّ أيضا تحديد تأثيرها على التركيبة المجهريّة للخرسانة، وبالتالي على النفاذية النسبية للغاز. أيضا، تأثير حجم العينة (قطر العينة) على قياس نفاذية الغاز ليست بالغة الوضوح.

قد تمّ اقتراح طريقة لقياس النفاذية النسبية للماء السائل في هذا البحث لتحديد خصائص نفاذية الخرسانة المشبعة جزئيا، وذلك بنظام غير ثابت. لكل خرسانة مدروسة، تمّ تحديد علاقة أسية بين النفاذيته الجوهرية للماء السائل ودرجة تشبعه. تمّ أيضا حساب النفاذية الجوهرية بواسطة نموذج كاتز تومسون II، استنادا إلى نتائج المسامات المقاسة باستعمال الزئبق و تمّ مقارنتها مع تلك المقاسة تجريبيا مع كل الخرسانات الأربعة.

صلاحية النماذج الموجودة مسبقا لتقييم النفاذية النسبية في الوسائط غير المشبعة التي يسهل اختراقها تمّ اختبارها لأجل الخرسانة العادية المدروسة. تمّ اقتراح تعديل في نموذج فان قنوشتنن-مولم لحساب النفاذية النسبية للغاز وفقا لدرجة تشبع الخرسانة. النفاذية النسبية للماء حسب درجة التشبع يمكن أن تحدّد باستعمال نموذج ديكارلو المعدل.

كلمات البحث: ديمومة، خرسانة، نفاذية نسبية، درجة التشبع، تأثير الحجم.

Sommaire

Table des notations	11
Introduction générale	15
i.1. Contexte	15
i.2. Problématique générale et objectifs de la thèse	20
i.3. Organisation générale de la thèse	22

CHAPITRE I. Caractéristiques microstructurales et propriétés hydriques des bétons..... 24

I.1. Introduction	25
I.2. Microstructure du béton durci	26
I.2.1. Microstructure de la pâte de ciment.....	26
I.2.2. Structure et morphologie du gel de C-S-H.....	27
I.2.3. L'interface pâte-granulats.....	28
I.2.4. Distribution des tailles des pores.....	29
I.2.5. Connectivité et tortuosité des pores.....	31
I.3. L'eau dans le béton	32
I.3.1. Classification de l'eau dans la pâte du ciment.....	32
I.3.2. Observations sur le comportement hydrique du béton.....	37
I.3.3. Compréhension des interactions eau-matrice : Isotherme de sorption....	41
I.3.4. Expression de la pression capillaire.....	43
I.3.5. Propriétés de transport - Coefficients de diffusion et perméabilité.....	45
I.4. Conclusions	47

CHAPITRE II. Transferts des fluides sous pression dans les bétons..... 48

II.1. Introduction	49
II.2. Propriétés de transfert des fluides dans les bétons	50
II.2.1. Notions générales sur l'écoulement en milieu poreux.....	50
II.2.2. Perméabilité du béton.....	51
II.3. Paramètres influençant la perméabilité du béton	63
II.3.1. Influence du préconditionnement des échantillons sur la perméabilité..	63
II.3.2. Influence de la composition du béton sur la perméabilité.....	66
II.3.3. Influence du degré de saturation en eau sur la perméabilité des bétons.	72
II.3.4. Modèles prédictifs proposées pour le calcul de K_{rl} et K_{rg}	74
II.3.5. Résumé des différentes tailles d'échantillons testés en perméabilité.....	79
II.4. Conclusions	81

<u>CHAPITRE III.</u> Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.....	82
III.1. Introduction.....	83
III.2. Choix des matériaux et confection des éprouvettes.....	84
III.2.1. Le ciment.....	84
III.2.2. Les granulats.....	85
III.3. Mise en place, cure et préparation des échantillons.....	86
III.3.1. Mise en place.....	86
III.3.2. Cure.....	86
III.3.3. Préparation des échantillons.....	87
III.4. Caractéristiques mécaniques du béton.....	88
III.5. Mesure de la porosité accessible à l'eau.....	89
III.6. Porosimétrie par intrusion du mercure (PIM).....	90
III.7. Mesure de la perméabilité au gaz.....	91
III.7.1. Dispositif de mesure de la perméabilité au gaz.....	91
III.7.2. Protocole de mesure de la perméabilité au gaz.....	92
III.8. Mesure de la perméabilité à l'eau.....	94
III.8.1. Dispositif de mesure de la perméabilité à l'eau.....	94
III.8.2. Protocole de mesure de la perméabilité à l'eau.....	96
III.9. Le préconditionnement.....	98
III.10. Plan expérimental.....	100
<u>CHAPITRE IV.</u> Mesure de la perméabilité relative au gaz.....	102
IV.1. Introduction.....	103
IV.2. Résultats des essais de perméabilité apparente au gaz.....	104
IV.2.1. Perméabilité au gaz à l'état sec.....	104
IV.2.2. Influence du degré de saturation sur la perméabilité apparente.....	105
IV.3. Évolution de la perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation.....	110
IV.4. Évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation....	112
IV.5. Influence du préconditionnement des échantillons sur la perméabilité au gaz.....	113
IV.6. Influence du rapport E/C sur les propriétés de transfert du béton.....	116
IV.6.1. Influence du rapport E/C sur la perméabilité intrinsèque du béton.....	116
IV.6.2. Influence du rapport E/C sur la microstructure du béton.....	118
IV.6.3. Influence du rapport E/C sur la perméabilité relative au gaz.....	120
IV.6.4. Influence du rapport E/C sur l'évolution de la constante de Klinkenberg β	121
IV.6.5. Influence du rapport E/C sur la proportion de l'écoulement moléculaire pendant l'essai de perméabilité au gaz.....	122
IV.7. Influence de la classe de résistance du ciment sur la perméabilité au gaz du béton.....	123

IV.8. Influence de la taille de l'échantillon sur la perméabilité au gaz du béton...	125
IV.8.1. Influence de la taille de l'échantillon sur l'évolution de K_{int} en fonction de S_l	125
IV.8.2. Influence de la taille de l'échantillon sur la constante de Klinkenberg β	127
IV.8.3. Influence de la taille de l'échantillon sur la perméabilité relative au gaz.....	127
IV.8.4. Effet de la taille sur les mesures de K_{int} des bétons B30, B32 et B40.....	128
IV.9. Variation de la perte en masse en fonction de la perméabilité relative.....	131
IV.10. Conclusions.....	132
<u>CHAPITRE V.</u> Mesure de la perméabilité relative à l'eau.....	134
V.1. Introduction.....	135
V.2. Débit d'eau en fonction de la saturation du béton.....	136
V.3. Évolution de la perméabilité intrinsèque à l'eau K_l en fonction de la saturation.....	138
V.4. Évolution de la perméabilité relative à l'eau en fonction de la saturation.....	140
V.5. Influence du rapport E/C sur la perméabilité intrinsèque à l'eau.....	142
V.6. Influence de la classe de résistance du ciment sur la perméabilité à l'eau du béton.....	143
V.7. Influence de la taille de l'échantillon sur la mesure de la perméabilité à l'eau.....	144
V.8. Évaluation de K_l par la mesure de la profondeur de pénétration de l'eau....	146
V.9. Évaluation de la perméabilité par le modèle de Katz-Thompson II.....	148
V.10. Conclusions.....	153
<u>CHAPITRE VI.</u> Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative du béton.....	155
VI.1. Introduction.....	156
VI.2. Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative au gaz du béton.....	157
VI.2.1. Calcul de la perméabilité relative au gaz par des modèles prédictifs.....	157
VI.2.2. Évaluation de K_{rg} par la relation de Van Genuchten-Mualem des échantillons du béton différemment pré-conditionnés.....	159
VI.2.3. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rg} des bétons de différents rapports E/C	161
VI.2.4. Calcul de K_{rg} à l'aide du modèle de Van Genuchten-Mualem pour des bétons à base des ciments de différentes classes de résistance mécanique.....	161
VI.2.5. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rg} pour des échantillons du béton de différentes tailles.....	162

VI.3. Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative à l'eau du béton.....	166
VI.3.1. Calcul de la perméabilité relative à l'eau par des modèles prédictifs.....	166
VI.3.2. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rl} des bétons de différents rapport E/C	167
VI.3.3. Évaluation de K_{rl} à l'aide des modèles prédictifs pour des bétons à base des ciments de différentes classes de résistance mécanique.....	168
VI.3.4. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rl} des échantillons du béton de différentes tailles.....	170
VI.4. Conclusions.....	171
Conclusion générale	174
Références bibliographiques.....	181
Liste des figures.....	193
Liste des tableaux.....	200
Annexe A. Indicateurs de durabilité.....	202
Annexe B. Exemple de calcul de K_{int} à partir de différentes K_{app} mesurées à différentes pressions d'injection.....	205
Annexe C. Fiche technique de l'adjuvant utilisé dans la formulation du béton B40.....	207
Annexe D. Exemple du calcul de K_l.....	209
Annexe E. Récapitulatif des résultats de K_{int} mesurés à différents degrés de saturation sur trois échantillons pour chaque béton étudié.....	210
Annexe F. Mesure de la porosité totale par intrusion de mercure.....	213

Table des notations

La liste, qui suit, répertorie l'ensemble des notations utilisées dans ce mémoire.

Abréviations

BO	Béton Ordinaire
BHP	Béton à Haute Performance
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
AFGC	Association Française de Génie Civil
AFPC	Association Française pour la Construction
AFREM	Association Française de Recherches et d'Essais sur les Matériaux
C-S-H	Silicate de Calcium Hydraté
E/C	Rapport massique Eau sur Ciment

	Signification	Unité
A	Air de perméabilité (surface de contact de l'eau avec l'échantillon)	m^2
Å	Angström	-
α	Angle de contact liquide solide	rad
b	Nombre de branches entre les pores	-
β	Constante de Klinkenberg	-
C	Connectivité des pores	-
Ca	Atome de calcium	-
$Ca(OH)_2$	Portlandite	-
$CaCO_3$	Carbonate de calcium	-
C_3S	Silicate Tricalcique	-
C_2S	Silicate bicalcique	-
C_3A	Aluminate tricalcique	-
C_4AF	Alumino-ferrite tétracalcique	-
D	Diamètre des molécules de gaz	nm
D_a	Coefficient de diffusion hydrique apparent	m^2/s
D_{v0}	Coefficient de diffusion libre (hors milieu poreux) de la vapeur d'eau dans l'air	m^2/s
$D_a(S_l)$	Diffusivité hydrique totale de l'humidité en fonction de la saturation	m^2/s
$D_l(S_l)$	Diffusivité de l'eau en phase condensée en fonction de la saturation	m^2/s
$D_v(S_l)$	Diffusivité de l'eau en phase vapeur en fonction de la saturation	m^2/s
f	Facteur de résistance	-
f_c	Résistance à la compression	MPa

g	Accélération de la pesanteur	m/s
h_r	Humidité relative	%
ΔH	Charge hydraulique appliquée au fluide	m
\vec{i}	Gradient hydraulique	-
k	Constante de Boltzmann ($1,38066 \cdot 10^{-23}$)	J/K
K	Coefficient de perméabilité de Darcy (conductivité hydraulique)	m/s
K_{app}	Perméabilité apparente	m ²
K_{eff}	Perméabilité effective	m ²
$K_{g,eff}$	Perméabilité effective au gaz (K_{int} mesurée à x degré de saturation)	m ²
$K_{l,eff}$	Perméabilité effective à l'eau (K_l mesurée à x degré de saturation)	m ²
K_{int}	Perméabilité intrinsèque (mesurée au gaz)	m ²
K_l	Perméabilité à l'eau liquide	m ²
K_{rg}	Perméabilité relative au gaz	-
K_{rl}	Perméabilité relative à l'eau	-
L	Longueur de l'échantillon ou distance parcourue par le fluide	m
L_e	Longueur effective du déplacement du fluide	m
μ	Viscosité dynamique du fluide	Pa.s
μ_l	Viscosité dynamique de l'eau liquide	Pa.s
M	Masse molaire du fluide	kg/mol
m	Paramètres de Van-Genuchten	-
M_{sec}	Masse sèche de l'échantillon	kg
M_{sat}	Masse saturée de l'échantillon	kg
M_{sat}^{imm}	Masse de l'échantillon saturé immergé	kg
M_v	Masse molaire de la vapeur	kg/mol
n	Nombre de nœuds reliant les différentes branches	-
P_c	Pression capillaire	Pa
P_{atm}	Pression atmosphérique	Pa
P_{inj}	Pression d'injection de fluide percolant	Pa
P_g	Pression totale de gaz	Pa
P_l	Pression totale de l'eau liquide	Pa
P_v	Pression de vapeur	Pa
P_{vs}	Pression de vapeur saturante dans le milieu	Pa
P_m	Pression moyenne de l'écoulement de fluide	Pa
P_e	Pression du fluide de percolation en amont	Pa
P_s	Pression du fluide de percolation en aval	Pa
P_{Hg}	Pression du mercure	Pa
$\vec{\nabla}P$	Gradient de pression du fluide	Pa
Q	Débit volumique	m ³ /s

q	Paramètres de Van Genuchten	-
Q_s	Débit volumique mesuré à l'extrados de la cellule de l'essai	m^3/s
Q_{visq}	Débit des écoulements visqueux	m^3/s
Q_{gliss}	Débit des écoulements par glissement	m^3/s
R	Constante des gaz parfaits (8,3144)	J/mol.K
r	Rayon de pore où le ménisque se forme	μm
R^2	Coefficient de régression	-
R_p	Rayon moyen du capillaire pénétré par le mercure	μm
r_0	Rayon poreux considéré pour la modélisation du milieu par un assemblage de tubes	μm
ρ	Masse volumique du fluide	kg/m^3
ρ_l	Masse volumique de l'eau liquide	kg/m^3
ρ_e	Masse volumique du fluide de percolation en amont	kg/m^3
ρ_s	Masse volumique du fluide de percolation en aval	kg/m^3
Si	Atome de silicium	-
S_l	Degré de saturation en eau	-
σ	Tension superficielle de l'interface entre l'eau liquide et la phase gazeuse	$N.s^{-1}$
T	Température absolue	K
τ	Tortuosité	-
τ_{xy}	Composante de la contrainte tangentielle pour un écoulement plan (Oxy)	Pa
\vec{v}	Vitesse de filtration	m/s
v_e	Vitesse de l'écoulement du fluide de percolation en amont	m/s
v_s	Vitesse de l'écoulement du fluide de percolation en aval	m/s
$v_x(r)$	Vitesse locale du fluide dans un capillaire de rayon r	m/s
v_{vx}	Vitesse locale d'écoulement due à la viscosité	m/s
v_s	Vitesse locale d'écoulement due au glissement du fluide aux parois du capillaire	m/s
λ	Libre parcours moyen des molécules de gaz	nm
Φ_{eau}	Porosité accessible à l'eau	%
Φ_{Hg}	Porosité au mercure	%
θ	Angle de contact entre le mercure et la paroi du pore	rad
w	Teneur en eau massique	%
z	Altitude par rapport au niveau de référence	m

Introduction générale

i.1. Contexte

De nos jours, les structures en béton sont devenues de plus en plus minces et sont souvent exposées à des environnements agressifs (environnement marin ou environnements pollués des zones industrielles) ou à des conditions climatiques sévères. Donc, au cours de son cycle de vie, le béton peut être exposé à des agressions diverses, susceptibles de remettre en cause sa durabilité : attaques sulfatiques externes, pénétration des ions chlorure, gel, abrasion,... etc. Il peut lui-même être source de réactions délétères (alcali-réaction, formation d'ettringite différée,... etc.) [NGUY 07]. La durabilité du béton dans de telles conditions, est devenue un sujet d'intérêt majeur et, par conséquent, un domaine de recherche largement exploré. C'est dans ce cadre que s'insère la présente étude.

En plus des aspects mécaniques, la durée de vie d'un ouvrage en béton armé est fortement liée à la durabilité de l'association béton/armature, autrement dit, la capacité de résister aux attaques physico-chimiques conduisant à la défaillance des matériaux et donc de la structure [WANG 12]. En effet, les aciers du béton armé sont susceptibles de se corroder dès que le béton (d'enrobage) n'assure plus son rôle de protection physique et/ou chimique. Les opérations de contrôle technique organisées dans le monde, montrent que de nombreux ouvrages ou éléments d'ouvrages en béton armé présentent des dégradations, dont la cause principale est la corrosion des armatures (cf. Fig. i-1). Ce phénomène électrochimique peut résulter de la pénétration de chlorures au sein du béton (surtout en environnement marin), comme il peut résulter aussi de la pénétration de l'eau et du gaz carbonique (carbonatation) ou de l'oxygène (cf. Fig. i-2). La corrosion des armatures peut ensuite amener de la fissuration dans le béton, une perte d'adhérence acier/béton ainsi qu'une perte de section des armatures [BARO 08], ce qui engendre une diminution de la capacité portante des structures touchées par la corrosion des armatures. De tels désordres sont de plus en plus fréquents dans le domaine de la construction.

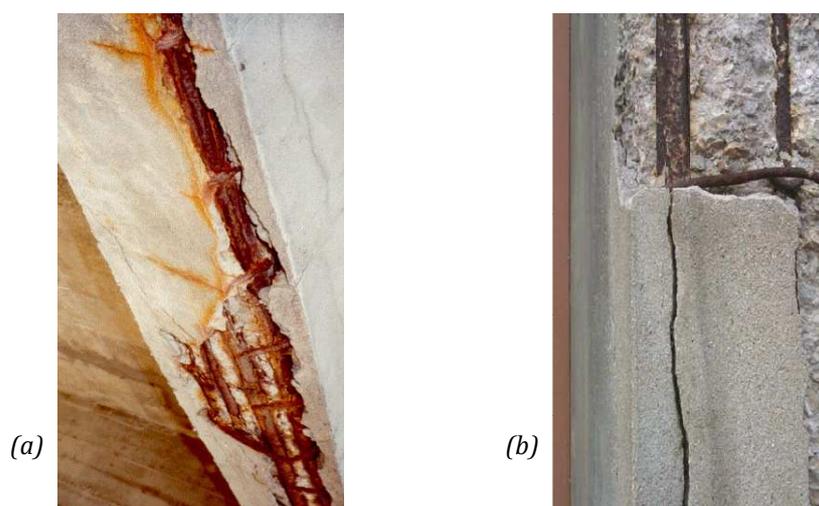


Fig. i-1. Exemples de dégradations d'ouvrages dues à la corrosion des aciers du béton armé.
(a) Pont en bord de mer, (b) Bâtiment en zone urbaine,

[<http://www.gramme.be/unite9/pmwikiOLD/pmwiki.php?n=BETON0607.CauseDeDeterioration>]

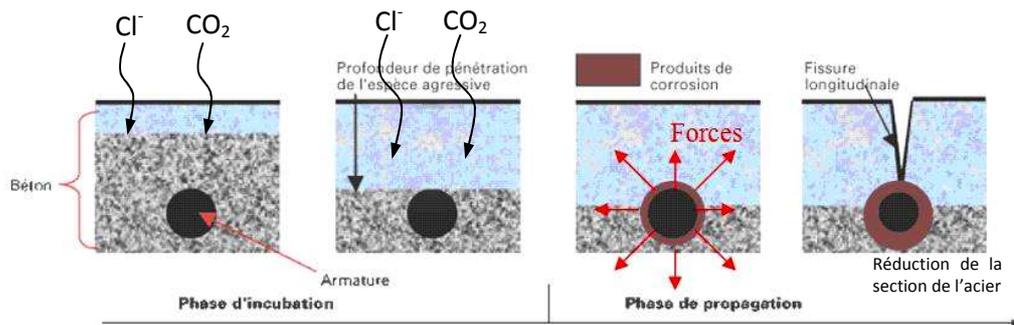


Fig. i-2. Corrosion des armatures du béton armé. Schématisation de l'évolution des dégradations du béton et de l'acier [BARO 08].

Trois modes de transport, gouvernés par différents mécanismes physiques et/ou chimiques peuvent avoir lieu dans les ouvrages en béton :

La diffusion : pénétration d'agents agressifs sous l'effet d'un gradient de concentration. Un transport d'ions agressifs au sein du béton par diffusion va typiquement avoir lieu pour des structures exposées à un environnement sévère (environnement marin par exemple), pour lesquelles la concentration des ions agressifs est plus importante à l'extérieur qu'à l'intérieur de la structure.

La perméabilité : écoulement d'un fluide sous l'effet d'un gradient de pression. Le transport par perméabilité sera prédominant pour des structures soumises à de forts gradients de pression (structures devant contenir des fluides: réservoirs, barrages, enceinte de confinement de centrales nucléaires, structures immergées, etc.) ; mais peut aussi avoir lieu sous l'effet de gradients de pression bien plus faibles pour d'autres éléments de structures (poutres, dalles, murs, etc.).

La succion capillaire : attraction d'un fluide dû à des effets capillaires. Le transport par succion capillaire aura lieu lorsqu'une structure est soumise à des cycles de mouillage-séchage.

Dépendamment des structures considérées, ces trois modes de transport peuvent avoir lieu simultanément, mais souvent avec la prédominance de l'un des modes par rapport aux deux autres [DESM 11] (cf. § 1.2.5.1). Une caractérisation des matériaux à matrice cimentaire à l'égard de la durabilité des structures passe ainsi par une évaluation préliminaire de leurs propriétés de transport en humidité [CARÉ 11]. Ce sont en effet ces propriétés qui conditionnent les variations de teneur en eau liquide des structures soumises tout au long de leur vie à des conditions hydriques variables. À ce titre la perméabilité à l'eau liquide du béton peut constituer un « indicateur » majeur de la durabilité des ouvrages en béton armé (cf. *Annexe A*).

Par ailleurs, la pénétration du gaz carbonique (carbonatation) est un phénomène conduisant à la corrosion des armatures du béton armé (cf. Fig. i-3). La réaction du gaz carbonique, présent dans l'atmosphère, avec la pâte de ciment entraîne un abaissement du pH du béton avec pour conséquence une dépassement des aciers [DUVA 92]. La perméabilité aux gaz est donc un paramètre fondamental de la durabilité du béton armé. Elle caractérise la capacité du béton à résister à la pénétration des gaz.

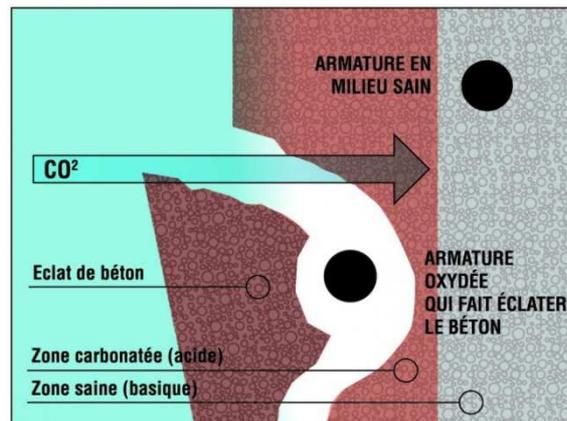


Fig. i-3. Corrosion initiée par la carbonatation [http://www.bertolit.ch].

Lorsque les transferts de fluide dans le béton sont susceptibles d'avoir lieu sous formes gazeuse et liquide, il est important de quantifier à la fois la perméabilité aux gaz et celle aux liquides, notamment à l'eau (étant donné que dans la pratique on n'a pas forcément coïncidence entre ces deux paramètres pour les bétons). La perméabilité à l'eau liquide et la perméabilité aux gaz apparaissent donc comme des paramètres fondamentaux qui régissent les transferts de fluide dans les bétons. De plus, ces paramètres sont accessibles expérimentalement à partir d'essais de laboratoire.

Au titre de la pertinence théorique dans la quantification et la prévision de la durabilité du béton armé, et au titre de l'accessibilité expérimentale, **il est donc justifié de qualifier ces paramètres d'indicateurs de durabilité généraux** (cf. *Annexe A*). Les évaluer pour des bétons ordinaires non saturés est l'objet de ce qui suit.

À l'heure actuelle et étant donné le coût très élevé de l'entretien des constructions, de plus en plus de constructeurs et de maîtres d'ouvrages intègrent dans la conception les aspects de durabilité des bétons [DEBY 08]. La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée donc comme une préoccupation majeure de la norme européenne EN 206-1, intitulée « *Béton. Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité* », et une des raisons de son évolution. La durabilité d'un béton est fonction du type d'attaque extérieure qu'il pourrait subir pendant sa durée d'utilisation et, pour chaque type d'attaque, du niveau d'agressivité croissant vis-à-vis du type d'attaque considéré [EN 206-1].

Même si la norme EN 206-1 n'a pas été conçue dans une démarche performantielle, elle relie les conditions d'exposition (type de dégradation et intensité) à des spécifications sur la composition du béton pour une durabilité visée de 50 ans en moyenne [ROZI 07]. Donc, dans les textes normatifs et réglementaires, la durabilité du béton est prise en compte via la notion de classe d'exposition. Le prescripteur identifie les agressions de l'environnement auxquelles le béton de l'ouvrage ou de chaque partie d'ouvrage sera exposé pendant la durée d'utilisation de la structure [EN 206-1]. Alors, la détermination des classes d'exposition est fondamentale. Elle constitue la première étape de prescription du béton. Elle permet de définir ses exigences en termes de performances et de durabilité en adéquation avec l'humidité de l'environnement (cf. *Tab. i-1*). Cela tient compte de l'influence observée du taux de saturation du béton sur la pénétration du gaz carbonique CO_2 et des ions Chlores.

Tab. i-1. Extrait du tableau 1 de la norme européenne EN 206-1. Définition des classes d'exposition.

2. Corrosion induite par carbonatation		
<p>Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est exposé à l'air et à l'humidité, les différentes classes d'expositions sont classées ci-après :</p> <p>NOTE : On entend par condition d'humidité celle du béton recouvrant les armatures ou les pièces métalliques noyées ; mais, dans de nombreux cas, cette humidité peut être considérée comme le reflet de l'humidité ambiante. Dans ces cas là, une classification fondée sur les différents milieux ambiants peut être appropriée ; il peut ne pas en être de même s'il existe une barrière entre le béton et son environnement.</p>		
Désignation de la classe	Description de l'environnement	Exemples informatifs illustrant le choix des classes d'exposition
XC1	Sec ou humide en permanence	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est faible. Béton submergé en permanence dans de l'eau.
XC2	Humide, rarement sec	Surfaces de béton soumises au contact à long terme de l'eau. Un grand nombre de fondations.
XC3	Humide modérée	Béton à l'intérieur de bâtiments où le taux d'humidité de l'air ambiant est moyen ou élevé. Béton extérieur abrité de la pluie.
XC4	Alternance d'humidité et de séchage	Surfaces soumises au contact de l'eau, mais n'entrant pas dans la classe d'exposition XC2.
3. Corrosion induite par les chlorures, ayant une origine autre que marine		
<p>Lorsque le béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine, contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage, les différentes classes d'exposition sont classées comme suit :</p>		
XD1	Humidité modérée	Surfaces de bétons exposées à des chlorures transportés par voie aérienne
XD2	Humide, rarement sec	Piscines. Béton exposé à des eaux industrielles contenant des chlorures.
XD3	Alternance d'humidité et de séchage	Eléments de ponts exposés à des projections contenant des chlorures ; Chaussées. Dalles de parc de stationnement de véhicules
4. Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer		
<p>Lorsque le béton contenant une armature ou des pièces métalliques noyées est soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin, les différentes classes d'exposition sont :</p>		
XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	Structures sur ou à proximité d'une côte
XS2	Immergé en permanence	Eléments de structures marines
XS3	Zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns	Eléments de structures marines

Pour les parties d'ouvrages situées en site maritime par exemple, seules les classes XC1 et XC4 sont utilisées. La classe XD peut concerner les ouvrages sur lesquels sont stockés des produits en vrac contenant des chlorures ayant une origine autre que marine ou les ouvrages en régions froides nécessitant l'utilisation de fondants. Selon la norme EN 206-1, quelques données complémentaires sur les conditions d'environnement et la détermination de la classe d'exposition XS sont précisées :

- Sont à classer en XS3 les éléments de structures en zone de marnage et/ou exposés aux embruns lorsqu'ils sont situés à moins de 100 m de la côte, parfois jusqu'à 500 m, suivant la topographie particulière des lieux.
- Sont à classer en XS1 les éléments de structures situés au-delà de la zone de classement XS3 et situés à moins de 1 km de la côte, parfois plus, jusqu'à 5 km, lorsqu'ils sont exposés à un air véhiculant du sel marin, suivant la topographie particulière.

Tous les ouvrages situés à proximité des côtes (moins de 5 km) ou les structures marines sont donc concernées par ce type d'actions environnementales [NE 206-1].

La norme EN 206-1 fixe dans une annexe informative les valeurs limites spécifiées applicables pour la composition et les propriétés du béton. Alors, pour chacune de ces classes d'exposition citées dans le **Tab. i-1**, sont définies des valeurs limites : rapports *E/C* maximaux teneurs minimales en ciment et classes de résistances minimales à la compression (cf. **Tab. i-2**).

Tab. i-2. Extrait du Tableau F.1 et de l'annexe F de la norme EN 206-1.
Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés du béton.

	Classes d'exposition									
	Corrosion induite par carbonatation				Corrosion induite par les chlorures					
					Eau de mer			Chlorures autres que l'eau de mer		
XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	
Rapport E/C maximal	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45
Classe de résistance minimale	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45
Teneur minimale en ciment (kg/m ³)	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320
<ul style="list-style-type: none"> • Les valeurs du Tableau F.1 sont fondées sur l'hypothèse d'une durée de vie de la structure prévue de 50 ans. • Les valeurs du Tableau F.1 correspondent à du ciment de type CEM I conforme à l'EN 197-1, et à des granulats dont la dimension nominale maximale est comprise entre 20 mm et 32 mm. • Les classes de résistance minimales ont été déterminées à partir de la relation existant entre le rapport eau/ciment et la classe de résistance du béton fabriqué à partir de ciment appartenant à la classe de résistance 32,5. 										

i.2. Problématique générale et objectifs de la thèse

Il est essentiel que chaque structure en béton puisse conserver sa résistance et continuer de remplir sa fonction tout au long de sa durée de vie utile. Il en résulte que le béton doit être en mesure de résister aux mécanismes de détérioration auxquels il peut être exposé.

Dans le cas de la corrosion des armatures et pendant la période d'incubation, c'est le transport de l'eau, du dioxyde de carbone et de l'oxygène et éventuellement des ions chlorure s'ils sont présents, qui entrent en jeu. Ces principaux fluides peuvent se déplacer au travers du béton de différentes façons, mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure poreuse du béton. Alors, la durabilité du béton dépend largement de la facilité avec laquelle les fluides, à la fois liquides et gaz, peuvent pénétrer et se déplacer à l'intérieur du béton ; c'est ce que l'on appelle communément la perméabilité du béton. La durabilité du béton et la corrosion de l'acier d'armature sont donc intimement liés à la perméabilité des surfaces en béton exposées [ALDE 99]. Elle représente la propriété la plus importante du béton régissant sa durabilité à long terme [BANT 05]. Cependant, son aptitude à se faire pénétrer par des agents agressifs varie de façon sensible en fonction du taux d'humidité qui peut évoluer dans le temps et selon le milieu environnant. Cette évolution de saturation en eau liquide peut nuire à la durabilité des ouvrages.

Pour plus d'un siècle, le coefficient de Darcy de la perméabilité a été utilisé comme une mesure de l'étanchéité du béton à partir de laquelle sa durabilité est souvent dérivée [ABBA 99]. Tel que rapporté par Darcy, la perméabilité est mesurée sur des matériaux complètement saturés en eau; mais en réalité le matériau béton connaît des fluctuations dans son niveau d'humidité dans le temps et selon le milieu environnant. Alors, l'état hydrique du béton est si important, car selon le taux de saturation différentes tailles de pores sont accessibles [BARO 94]. Coussy *et coll.* [COUS 98], ont en effet montré que l'évolution des propriétés physico-mécaniques des matériaux cimentaires dépend très fortement de leur état de saturation. Donc, le taux de saturation joue un rôle fondamental vis-à-vis des propriétés de transport [BARO 08]. Par conséquent, la mesure de la perméabilité est influencée par la teneur en eau du matériau ; par exemple, la perméabilité au gaz d'une éprouvette de béton augmente quand le taux de saturation moyen diminue [PARR 94], [JACO 98], [ABBA 98], [VILL 01].

De nombreuses avancées ont été entreprises ces dernières années dans la compréhension de l'évolution de la perméabilité au gaz (azote) du béton en particulier sous différents chargements thermomécaniques (cf. thèses de V. Picandet [PICA 01a] et de M. Choinska [CHOI 06]). Mais, dans l'absence d'une méthode de test standard, la technique conçue pour étudier l'effet de l'endommagement mécanique sur la perméabilité du béton peut être classée sur la base de : perméamètre, la configuration de la charge appliquée et le temps de l'essai (la durée de l'essai avant de prendre la mesure de perméabilité) [HOSE 09]. En effet, Picandet *et coll.* [PICA 01a], [PICA 01b] ont effectué une série d'essais sur des échantillons cylindriques de 5 cm d'épaisseur, dont ils ont étudié l'influence de l'humidité et de l'endommagement (mesures après chargement mécanique) sur la perméabilité au gaz (azote) du béton. Ils ont montré une relation entre la perméabilité aux gaz et l'endommagement mécanique. Ensuite, Banthia *et coll.* [BANT 05], [BANT 07] ont étudié l'effet du niveau de la charge, l'histoire de la charge et l'ajout de fibres sur la perméabilité à l'eau du béton qui a été mesurée sur des échantillons cylindriques creux pendant une charge

de compression dans un régime stationnaire de flux. Ensuite, Choinska *et coll.* [CHOI 06], [CHOI 07] ont étudié l'évolution de la perméabilité au gaz du béton sec sous un chargement thermique et mécanique (mesurée en présence d'une charge mécanique dans la phase pré-pic et post-pic en faisant varier la température de chauffage des éprouvettes cylindriques creuses sèches (perméabilité mesurée à chaud)). Par une étude expérimentale, Aubernon [AUBE 11] a déterminé l'évolution de la perméabilité au gaz Azote et à la vapeur d'eau du béton sous haute température et sous différents chargements mécaniques (pré-pic et post-pic) ainsi qu'après déchargement.

Au vu de ces travaux, on constate que l'on est capable de solliciter une éprouvette de béton sec sous un chargement mécanique et thermique et d'en mesurer la perméabilité. Par ailleurs, nous ne connaissons pas l'évolution de la perméabilité du béton pour différentes teneurs en eau du matériau.

Il est clairement indiqué dans la littérature que, la mesure de la perméabilité aux gaz nécessite moins temps que la perméabilité à l'eau liquide et produit des résultats plus reproductibles. Aussi, pour des bétons de qualité mécanique supérieure (BHP et BTHP), la mesure exacte et reproductible du coefficient de perméabilité à l'eau, devient difficile à réaliser [ABBA 99]. Cette difficulté fait que très peu de résultats expérimentaux existent concernant la perméabilité relative aux gaz (K_{rg}) des matériaux à base de ciment et encore moins concernant la perméabilité relative à l'eau liquide (K_{rl}), car des mesures de la perméabilité à l'eau liquide du béton ne sont pas systématiquement effectuées. Le procédé conventionnel pour mesurer la perméabilité est d'appliquer un gradient de pression sur un corps d'épreuve (application d'une pression de liquide dans des conditions d'écoulement laminaire) et mesurer le débit. Par conséquent, la perméabilité peut être mesurée lorsque le régime permanent est atteint. Mais, pour des mesures de perméabilité à l'eau, cela peut prendre des jours ou des semaines pour un béton de bonne qualité [EL-DI 95], et l'échantillon peut évoluer pendant ce temps (en raison de l'hydratation et / ou lessivage) [POWE 59]. En outre, il existe un risque élevé de fuite sous pression qui peut être difficile à détecter. Ainsi, la perméabilité dépend des caractéristiques du fluide, du réseau de pores et d'autres vides du matériau (microfissures, zone de transition interfaciale, etc.), et également de l'état hydrique de l'échantillon testé [BARO 07c].

L'objectif de ce travail est d'obtenir pour différents bétons, l'évolution de leur perméabilité aux gaz et à l'eau liquide en fonction de leur taux de saturation, et donc, d'aborder la perméabilité relative du béton partiellement saturé, en se limitant à l'étude des bétons ordinaires et à la détermination de quelques paramètres de formulation influençant les paramètres de transfert dans la perspective de déterminer la relation entre la perméabilité (au gaz et à l'eau liquide) et la saturation en eau. Cette évolution est caractéristique du matériau étudié. Ces résultats sont susceptibles d'être introduits dans des modèles de prévision des transferts dans les bétons et de prédiction de la durabilité des ouvrages [VILL 01].

Dans cette étude, un séchage par palier a été appliqué pour le préconditionnement des échantillons du béton saturé avant la mesure de la perméabilité au gaz. Pour ce faire, différentes températures ont été utilisées pour différentes durées. Donc, ce travail a également pour but d'évaluer l'effet du mode de séchage sur l'évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation.

Pour un béton durci, la perméabilité est souvent mesurée au laboratoire sur échantillons confectionnés ou carottes prélevées à partir de la structure. On trouve, par conséquent, des résultats de perméabilité à l'eau et au gaz utilisant des échantillons présentant diverses tailles (cf. **Tab. II-3**). Cette recherche vise aussi à étudier l'effet de la taille de l'échantillon testé sur la mesure de la perméabilité du béton en fonction de son degré de saturation.

La validation des modèles existants pour la prédiction de la perméabilité relative des milieux poreux en fonction de la saturation (à l'origine développés pour les sols) représente un objectif principal dès le début de ce travail de recherche.

i.3. Organisation générale du mémoire

Ce mémoire comporte deux parties : la première est liée à l'étude de la perméabilité relative au gaz du béton partiellement saturé et la seconde est consacrée à l'étude de la perméabilité relative à l'eau liquide, en fonction de quelques paramètres liés au préconditionnement et à la formulation des bétons testés.

Les chapitres I et II, ont été consacrés à une mise en revue des éléments bibliographiques concernant les caractéristiques microstructurales du béton, considéré comme une structure poreuse, et son comportement hydrique. Aussi, des notions sur les écoulements en milieu poreux, en phase liquide ou gazeuse, sous un gradient de pression, ont été présentées. Le cadre théorique de la mesure des paramètres de transferts (principalement la perméabilité) et de ses applications au béton partiellement saturé, est détaillé dans la première partie de ce document. De plus, les paramètres influençant la perméabilité du béton sont décrits. On présente dans un troisième chapitre, les caractéristiques physico-chimiques des matériaux étudiés, les résultats des essais effectués sur le béton à l'état frais et à l'état durci, ainsi que les modes opératoires des essais effectués sur le plan expérimental, principalement pour la mesure des perméabilités au gaz nitrogène et à l'eau liquide. On a aussi abordé dans le troisième chapitre, le problème de la mesure de perméabilité relative à l'eau pour un béton partiellement saturé. Le programme expérimental y a été donc détaillé.

On présente dans le chapitre IV, le travail au laboratoire qui consiste à déterminer la perméabilité au gaz nitrogène de quatre bétons ordinaires (B30, B32, B35 et B40) à différentes teneurs en eau, en mettant en évidence l'influence du degré de saturation en eau du matériau, du rapport E/C et de la pression appliquée pendant l'essai. Différentes procédures de séchage ont été suivies dans cette partie d'étude pour mettre en évidence l'impact du mode de séchage sur l'évolution de la perméabilité au gaz du béton. Des relations entre la perméabilité intrinsèque au gaz et la saturation en eau ont été donc déterminées pour les quatre BO étudiés. L'évolution de la perméabilité relative au gaz a été aussi déduite en fonction de la saturation du matériau. En outre, dans le but d'étudier l'effet de la taille de l'échantillon sur la mesure de la perméabilité au gaz, des échantillons de diamètres différents (15, 11 et 5 cm) ont été choisis.

L'étude de la perméabilité relative à l'eau a fait l'objet du cinquième chapitre. Une nouvelle méthode de mesure de la perméabilité à l'eau des bétons partiellement saturés a été mise en exergue.

L'évolution de la perméabilité à l'eau en fonction de la saturation en eau est déterminée et une relation empirique est établie pour chaque béton. Ainsi que la perméabilité relative à l'eau est calculée en fonction du degré de saturation des BO étudiés. L'influence du rapport E/C et de la classe de résistance du ciment utilisé ainsi que l'effet de la taille du corps d'épreuve sur la mesure de la perméabilité à l'eau du béton sont aussi abordés dans ce chapitre. De plus, les résultats de la perméabilité à l'eau liquide calculés par le modèle de Katz-Thompson II [KATZ 86] pour les milieux poreux, basés principalement sur les résultats de la porosimétrie au mercure, sont aussi présentés et comparés avec les résultats de la perméabilité intrinsèque obtenus expérimentalement pour tous les bétons étudiés.

Dans un dernier chapitre, la validation de différents modèles existants pour la prévision des transferts dans les milieux poreux non saturés a été vérifiée pour les bétons étudiés. Des ajustements de certains modèles -développés à l'origine pour les sols- ont été proposés dans cette partie d'étude pour la prédiction de la perméabilité relative au gaz et à l'eau liquide en fonction de la saturation des quatre bétons pour un bon ajustement avec les données obtenues expérimentalement sur des échantillons de différentes tailles.

En fin de ce mémoire de thèse, une conclusion générale de nos travaux est présentée et des perspectives sont proposées.

Chapitre I. Caractéristiques microstructurales et propriétés hydriques des bétons.

Sommaire

I.1. Introduction.....	25
I.2. Microstructure du béton durci.....	26
I.2.1. Microstructure de la pâte de ciment.....	26
I.2.2. Structure et morphologie du gel de C-S-H.....	27
I.2.3. L'interface pâte-granulats.....	28
I.2.4. Distribution des tailles de pores.....	29
I.2.5. Connectivité et tortuosité des pores.....	31
I.3. L'eau dans le béton.....	32
I.3.1. Classification de l'eau dans la pâte du ciment.....	32
I.3.2. Observations sur le comportement hydrique du béton.....	37
I.3.3. Compréhension des interactions eau-matrice : Isotherme de sorption	42
I.3.4. Expression de la pression capillaire.....	44
I.3.5. Propriétés de transport - Coefficients de diffusion et perméabilité.....	45
I.4. Conclusion.....	47

Chapitre I. Caractéristiques microstructurales et propriétés hydriques des bétons.

I.1. Introduction

La caractérisation microstructurale des matériaux à base de ciment constitue une étape-clé pour l'étude de leur durabilité. Dans ce chapitre, à l'aide des références bibliographiques consultées, la phase solide constituant le béton durci est décrite dans le détail.

Le béton est un matériau multiphasique constitué d'un squelette (mélange granulaire optimisé) et d'une matrice (pâte cimentaire). En premier lieu, on décrit de manière synthétique l'ensemble des réactions chimiques qui sont à l'origine de la formation de la pâte de ciment, ensuite la structure poreuse du béton est présentée en caractérisant le volume des vides par rapport aux solides ainsi que et la distribution de la taille de ces vides. Il est clair que, les caractéristiques du réseau poreux déterminent les propriétés de transfert telles que la perméabilité aux gaz ou aux liquides, c'est-à-dire l'aptitude du matériau à laisser pénétrer, sous forme liquide ou gazeuse, des agents potentiellement agressifs pour le béton ou les armatures (gaz carbonique, chlorures, sulfates,...). L'un des moyens d'accéder à ces propriétés de transfert consiste à les calculer à partir des caractéristiques de la structure poreuse. À titre d'exemple, ces caractéristiques interviennent dans les formules analytiques de calcul de la perméabilité aux liquides (modèle de Katz-Thompson par exemple (cf. § V.9)) et constituent également des données d'entrée primordiales dans tous les modèles prédictifs des processus de transfert [XU 97], [DAIA 00], [BARO 00]. Dans la deuxième partie de ce chapitre, l'eau présente dans le béton est décrite dans ces différentes phases. La prise en compte du transport de l'eau au sein du béton est d'une grande importance pour les matériaux à matrice cimentaire, car la teneur en eau affecte considérablement l'évolution des transferts hydriques qui peuvent se produire dans le béton. Dans ce but, des aspects théoriques concernant les isothermes de sorption, lesquelles décrivent les propriétés hygrométriques du béton, ainsi que des observations sur son comportement hydrique et les propriétés de transport (coefficient de diffusion et perméabilités) y sont aussi présentées.

I.2. Microstructure du béton durci

Le béton durci est un milieu humide, évolutif et poreux, très hétérogène en terme de microstructure [BARO 94]. Cette hétérogénéité est le résultat de la large étendue granulométrique des granulats ; mais aussi de la diversité des produits d'hydratation, très sensibles aux conditions d'hydratation et de conservation (température, humidité relative) [HAGE 04]. De manière générale, le matériau béton est un composite dans lequel on distingue deux phases : la matrice (pâte du ciment durci) et les granulats (gravillon et/ou gravier et sable). Il est donc caractérisé par une microstructure poreuse avec des pores de différentes tailles et de distribution aléatoire. La structure poreuse et la distribution des pores au sein du béton jouent un rôle très important non seulement sur la résistance mécanique, mais aussi sur les phénomènes de transport et d'interaction avec le milieu extérieur. Cette interaction a lieu à travers les pores interconnectés. Nous décrivons alors le milieu poreux comme la superposition de trois phases : solide indéformable, liquide et gazeuse. En particulier, la phase gazeuse est constituée d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau et la phase liquide est composée d'eau et d'ions (cf. Fig. I-1).

Pour toutes ces raisons, la porosité (et sa distribution) devient un paramètre très important pour la caractérisation du béton. La forme et la taille des pores changent dans chaque type de béton. En effet, l'eau en excès, utilisée pour la fabrication du béton, tend à s'évaporer et laisse derrière elle dans le corps du matériau cimentaire, des vides sous forme de canalicules. Ces vides constituent le premier squelette du réseau poreux dont le dosage et la nature du ciment ainsi que les agrégats mais aussi les conditions du béton pendant sa maturation, contribuent en synergie à son façonnage.

Dans la pâte de ciment, les parois d'un pore sont formées essentiellement par le gel C-S-H, et dans les pores, on trouve aussi de l'ettringite et de la portlandite (cf. § I.2.1). On présente ci-après la microstructure de la pâte de ciment, ces principaux hydrates avec les modèles morphologiques de sa structure, les diverses formes de l'eau dans le béton durci, ainsi que la structure de l'interface pâte/granulats (appelé auréole de transition).

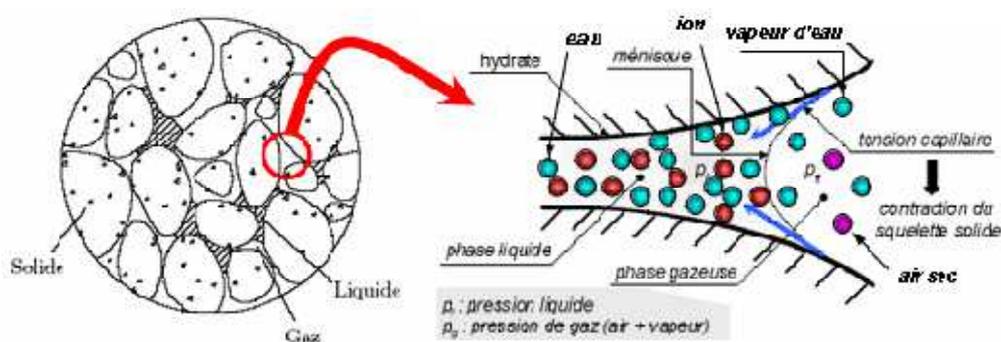


Fig. I-1. Description du milieu poreux avec les trois phases [NGUY 07]

I.2.1. Microstructure de la pâte de ciment

Dans le béton, la phase solide de la pâte du ciment est formée de grains de ciment plus ou moins hydratés. Cette pâte résulte de l'hydratation du liant, le ciment Portland anhydre

étant le plus utilisé. Ce dernier est essentiellement composé de clinker dont les quatre constituants majeurs sont :

- Silicate tricalcique (Alite) 60 à 65 % : $C_3S = 3CaO.SiO_2$;
- Silicate bicalcique (Bélite) 20 à 25 % : $C_2S = 2CaO.SiO_2$;
- Aluminate tricalcique (Célite I) 10 à 12 % : $C_3A = 3CaO.Al_2O_3$;
- Alumino-ferrite tétracalcique (Célite II) 8 à 10 % : $C_4AF = 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$.

Ces constituants du ciment présentent des réactions hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils se transforment en présence d'eau en hydrates qui précipitent et s'organisent en une structure mécaniquement résistante. Parmi les produits d'hydratation, il y a :

- Les silicates de calcium hydratés C-S-H qui sont aussi appelés gel et qui représentent le principal composé hydraté (50 à 70 % d'une pâte de ciment ordinaire) ;
- La portlandite $Ca(OH)_2$ appelée aussi hydroxyde de calcium (25 à 27 %) ;
- Les aluminates de calcium hydratés C_3AH_6 et les sulfo-aluminates de calcium hydratés, parmi lesquels l'ettringite ($3CaO.A_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$).

Pour un ciment donné, les quantités de C-S-H et de $Ca(OH)_2$ formées dépendent essentiellement du rapport E/C et du temps de réaction [CHEN 11]. Lors de l'hydratation du ciment, ces différents hydrates se forment et se développent dans les espaces situés entre les grains de ciment anhydre initiaux. Ce mode de remplissage des vides originels crée un réseau poreux très complexe [BARO 94]. La porosité résulte, la plupart du temps, de ce qui était à l'origine les espaces remplis d'eau entre les particules de ciments, formant des pores de grand diamètre (environ 1 μm), et d'autre pores plus fins, de diamètre inférieur à 2 nm, qui sont les résidus inter-lamellaires du gel de C-S-H (cf. § I.2.2), le produit principal de l'hydratation de la pâte de ciment [DIAM 85].

I.2.2. Structure et morphologie du gel de C-S-H

De nombreux modèles existent dans la littérature pour décrire la structure des C-S-H et leur morphologie, tels que le modèle de Powers-Brownyard [POWE 47] et le modèle de Feldman-Sereda [FELD 68] ; mais actuellement, elle est encore mal décrite et détaillée. Toutefois, il semble que le modèle de Feldman et Sereda (1968) (cf. Fig. I-2) soit le plus à même de justifier la plupart des comportements différés de la pâte de ciment [GUÉN 97].

Feldman et Sereda (1968) [FELD 68] considèrent dans leur modèle que la pâte de ciment est construite par une structure lamellaire (couches) irrégulière. Dans ce modèle, le C-S-H se présente sous la forme de fibres formées de lamelles enroulées sur elles mêmes, chaque lamelle se présente sous forme de 2 à 3 feuillets d'une épaisseur de trois couches moléculaires. Chaque couche a une épaisseur moyenne de 30 Å et un espacement de l'ordre de 17 Å [YURT 03]. Hansen en 1986 [HANS 86] a estimé, à partir de mesures au microscope électronique à balayage, que les dimensions d'une lamelle de C-S-H, considérée de forme prismatique, sont environ de $100000 \times 5000 \times 300 \text{ nm}^3$. Chaque feuillet est composé d'une couche centrale d'octaèdres de chaux insérés entre deux couches de tétraèdres de silice. Dans la structure proposée par Sierra (1980), l'eau peut apparaître sous trois formes : interfeuillet, interlamellaire et hydroxylique [BARO 94]. L'eau est également adsorbée sur les faces externes des lamelles et se trouve à l'état libre ou quelque peu structurée dans les pores interlamellaires qui peuvent atteindre quelques dizaines d'Angstrom. La valeur avancée est d'environ 20 Å, ce qui implique qu'il ne peut pas y avoir plus de 6 à 7 molécules

d'eau remplissant l'espace entre les feuillets puisque la molécule d'eau a une dimension de 2,6 Å [HAGE 04].

Les propriétés principales du gel C-S-H ne sont pas fortement influencées par l'eau adsorbée, mais plutôt par l'introduction et l'élimination des molécules d'eau entre les couches interlamellaires [FELD 68]. La pénétration ou le départ d'eau des espaces interlamellaires (entre lamelles) et interfoliaires (entre feuillets) sont possibles. Ces départs et entrées d'eau (interfoliaires) sont les phénomènes prédominants expliquant les variations dimensionnelles observables au cours du temps sous diverses sollicitations [FELD 68].

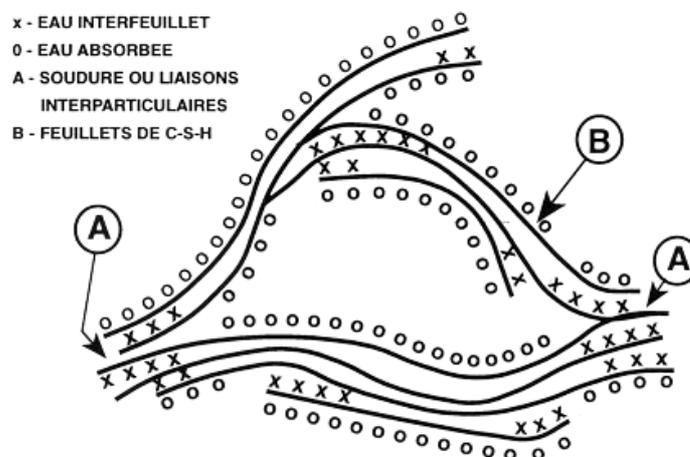


Fig. I-2. Modèle des particules de C-S-H de Feldman et Sereda [FELD 68], revu par Sierra [SIER 82] (cité par Baroghel-Bouny [BARO 94] et Yurtdas [YURT 03]).

I.2.3. L'interface pâte/granulats

Dans un béton, la liaison qui s'établit au cours de l'hydratation entre la pâte de ciment et les matériaux qu'elle enrobe, se traduit par une zone de pâte particulière appelée « auréole de transition » ou interface pâte/granulats [LARB 93], [SCRI 04]. C'est la partie la plus poreuse, la mieux cristallisée, et la moins résistante dans un béton durci. Tant du point de vue mécanique que du point de vue de la durabilité ou de la perméabilité, ces zones constituent les « maillons faibles » du matériau [BUIL 92].

Dans cette zone, la pâte de ciment présente une cohésion plus faible, due à un excès local d'eau : un film liquide s'adsorbe sur la surface du granulat au moment du gâchage, modifiant la liaison au cours de l'hydratation entre la matrice cimentaire et le granulat. Cette liaison entre la pâte de ciment et les granulats qu'elle enrobe, dépend de la nature des deux phases en présence, de la concentration en ciment de la pâte, des conditions de conservation et de la nature des granulats [BARO 94], [BILL 03]. Nous distinguons les granulats *réactifs* et *neutres* en contact avec la pâte de ciment. Les granulats calcaires (réactifs) présentent les plus fortes liaisons avec la pâte de ciment du fait des réactions chimiques qui se produisent au cours du temps et augmentent les forces d'adhésion [PIAS 94]. La réaction entre CaCO_3 provenant des granulats calcaires et les aluminates tricalciques et les aluminato-ferrites tétracalciques engendrent une formation des monocarbo-aluminates de calcium

$C_3A.CaCO_3.H_{11}$. Ainsi la zone de transition entre les granulats calcaires et la pâte de ciment est plus résistante et de perméabilité plus faible. L'augmentation de la résistance du matériau béton, réalisé avec les granulats de cette nature, a été observée contrairement aux granulats du type quartz (siliceux) [MALI 92], qui sont neutres par rapport à la pâte de ciment. Dans le cas des granulats d'origine siliceuse (neutres), l'interface pâte/granulats constitue une zone où les hydrates sont faiblement liés aux granulats et s'en détachent facilement. Il est à souligner également que la forme des granulats joue un rôle très important car on observe des liaisons plus rigides, au niveau de l'auréole de transition, pour des granulats concassés que pour des granulats roulés [MEHT 86], [MORA 92].

Dans les bétons ordinaires, cette interface pâte/granulat est mécaniquement plus faible et présente une porosité plus importante que le reste de la matrice ; les pores plus grossiers dans cette zone, deviennent un réseau de cheminement privilégié pour les transports de masse [DIAM 04]. Salih (1987) [SALI 87] a montré que la perméabilité de l'interface est plus grande que celle de la matrice. L'épaisseur de l'auréole de transition augmente avec le diamètre du granulat et avec le rapport E/C , avoisinant les 30 μm ; mais reste dans tous les cas inférieure à 50 μm [MASO 82], [DIAM 01].

I.2.4. Distribution de la taille des pores

La porosité, définie comme le rapport du volume des pores sur le volume total, est le paramètre normalement utilisé pour la caractérisation du réseau poreux du béton. Mais ce paramètre n'est pas suffisant car c'est plutôt la distribution des pores qui influence les propriétés physiques du milieu, notamment la résistance mécanique et la perméabilité.

À partir d'une courbe porométrique, on peut donner une classification des pores selon leur taille (leur diamètre) de la manière suivante :

- **Micropores** : avec un diamètre < 2,6 nm. Ces pores de très petites tailles n'ont pas une influence négative sur la durabilité du béton, mais peuvent avoir une influence sur le retrait de dessiccation et le fluage.
- **Méso-pores** : ou pores capillaires avec un diamètre entre 2,6 et 50 nm. Le volume total du mélange ciment-eau ne change pas de manière significative pendant l'hydratation. Par contre, la place occupée au début par l'eau et le ciment est remplacée progressivement par les produits hydratés. L'espace qui n'est pas occupé par les hydrates et le ciment anhydre forme le réseau poreux. En ce qui concerne les capillaires, on peut faire une distinction supplémentaire entre les petits pores capillaires (< 5 nm) et les grands pores capillaires (5 - 50 nm). Les pores capillaires sont généralement considérés comme les plus importants dans la microstructure du béton : du point de vue de la durabilité, l'influence qu'ils ont sur les mécanismes de transport est très importante.
- **Macropores** : ou pores d'air, avec un diamètre (> 50 nm). Typiquement, ces pores ont une forme sphérique, et leur présence dans le béton est due à deux causes :
 - Ils se produisent pendant le malaxage ;
 - Ils se forment à cause de l'utilisation d'additifs particuliers (ex. adjuvant entraîneur d'air), qui gardent de l'air pour améliorer certaines caractéristiques (ex. la résistance au gel et au feu).

Les micropores sont souvent considérés comme faisant partie de la structure du C-S-H. Les méso- et macro-pores sont décrits comme la partie capillaire des pores. Une différenciation supplémentaire s'avère nécessaire pour la description du réseau poreux :

Il faut donc distinguer entre porosité ouverte et porosité fermée. La porosité ouverte désigne l'ensemble des pores qui sont connectés les uns aux autres et qui permettent le transport du liquide/gaz (ex. pores capillaires). Au contraire, les pores fermés ne sont pas connectés (ex. pores d'air) et n'ont clairement aucune influence sur les phénomènes de transport.

Les pores présents dans la pâte de ciment durcie ont donc une géométrie très complexe et des dimensions qui s'étalent de l'échelle nanométrique à l'échelle centimétrique. Le gel C-S-H étant lui aussi une structure poreuse, mais à une échelle inférieure à celle des vides initiaux, une caractéristique importante de cet espace poreux connecté va être l'étendue de sa distribution en tailles. Deux gammes de tailles de pores sont généralement présentes dans la pâte :

- **Les pores capillaires**

Ils sont formés durant la structuration de la pâte de ciment. Pour un rapport E/C donné, leur volume décroît au cours de l'hydratation. La porosité capillaire dépend donc du rapport E/C et du degré d'hydratation du ciment ; Plus E/C est faible et plus les dimensions et le nombre des pores capillaires sont faibles [MIND 09]. En raison de la maniabilité du béton (surtout ordinaire), le volume d'eau fourni pour la fabrication du béton est supérieur au volume nécessaire pour l'hydratation. Par conséquent, cet excédent d'eau s'évacue par séchage au cours du temps et laisse des pores capillaires disponibles pour la circulation des gaz et fluides. Ces pores capillaires ont une dimension caractéristique qui peut atteindre 1 μm et contiennent de l'eau en conditions saturées ; mais ils perdent leur eau au contact de l'air [THOR 99]. Ces pores, détectables par porosimétrie au mercure pour des matériaux à fort rapport E/C , sont les vestiges des espaces intergranulaires de la pâte de ciment fraîche, leur volume décroît au cours de l'hydratation [BARO 94]. Le réseau capillaire, initialement connecté, perd sa connectivité progressivement, à l'exception des matériaux ayant un rapport eau/ciment élevé ($E/C > 0,6$) dont le réseau poreux capillaire resterait continu. Par conséquent l'écoulement à travers le matériau se fait à la fois à travers la porosité capillaire résiduelle et à travers la porosité des hydrates [VERD 01].

- **Les pores du gel de C-S-H (pores des hydrates)**

La dimension caractéristique de cette porosité est de l'ordre du nanomètre ($\leq 2 \text{ nm}$), beaucoup plus faible que celle de la porosité capillaire. Ces pores sont généralement des caractéristiques intrinsèques aux hydrates formés et indépendants de la formulation de la pâte de ciment (du rapport E/C). Les pores relatifs aux hydrates représentent au minimum 26 à 28 % en volume pour une pâte ordinaire. Dans cette catégorie, sont classés les pores du gel de C-S-H dont deux types sont cités dans la littérature :

- Les pores inter-lamellaires (ou inter-cristallites) qui sont situés entre les particules de gel (diamètre d'une dizaine d'Angströms) ;
- Les pores inter-feuillets (ou intra-cristallites) qui sont situés à l'intérieur même des particules de gel, il s'agit d'espaces extrêmement petits (quelques angströms de largeur).

La représentation schématique suivante (cf. Fig. I-3), donnée par Mehta [MEHT 86], permet de visualiser le type de répartition porométrique susceptible d'exister au sein d'une pâte de ciment durci. Elle résume donc ce qui vient d'être présenté.

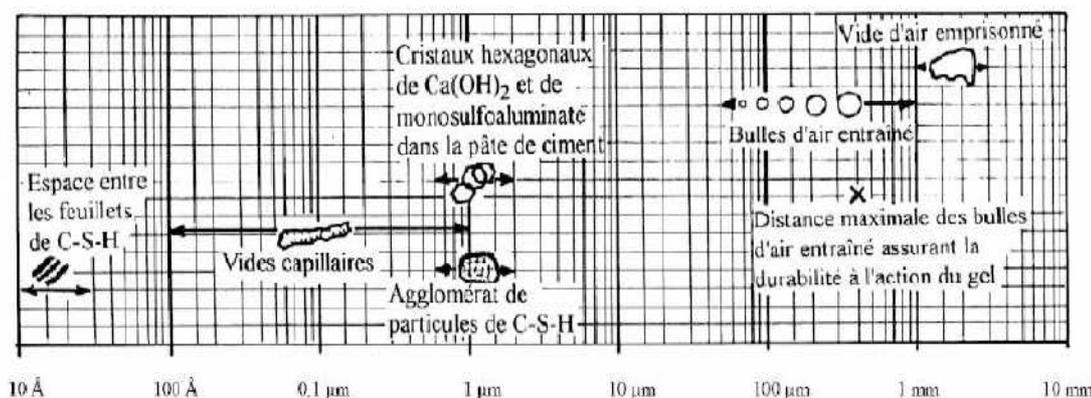


Fig. I-3. Les différentes formes de pores dans la pâte de ciment durci classées par taille d'après Mehta et Monteiro [MEHT 93].

I.2.5. Connectivité et tortuosité des pores

Dans le but de mieux appréhender les chemins d'écoulement, il convient de préciser les notions de connectivité et de tortuosité. La connectivité (C) est un paramètre de la topologie et de la constrictivité de la structure poreuse qui caractérise le degré avec lequel une structure poreuse est connectée [CHOI 06]. Elle correspond au plus grand nombre de branches du réseau poreux pouvant être coupées sans se déconnecter des nœuds du reste du réseau. Le paramètre de connectivité peut aider lui aussi à comprendre l'arrangement du réseau poreux et il se définit par la relation $C = b - n + 1$ où b est le nombre de branches (pores, bras, cavités) et n est le nombre de nœuds reliant les différentes branches. Il faut par exemple que la phase gazeuse soit connectée à travers tout le matériau pour pouvoir s'écouler [VERD 01]. Il en est de même pour la phase liquide, il faut qu'elle soit continue pour qu'il y ait écoulement en phase liquide.

Le schéma suivant présente l'exemple d'un réseau poreux dans lequel chaque nœud représente un pore, chaque nœud étant relié ou non à ceux qui l'entourent (cf. Fig. I-4). On représente la connectivité maximale d'un tel réseau; plus le nombre de liens va diminuer et plus cette connectivité va être faible.

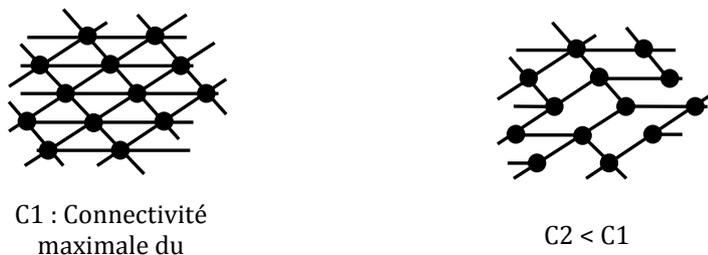


Fig. I-4. Représentation schématique de la connectivité d'un réseau poreux.

La tortuosité τ du milieu caractérise les obstacles au cheminement du fluide dans la structure poreuse. Elle est introduite dans le modèle géométrique de la perméabilité de

Carmen-Kozeny (1956) [CARM 56], [AÏT-M 99], [AÏT-M 02], [AMIR 05]. La tortuosité est définie comme un rapport de la longueur réelle du parcours d'un fluide, c'est-à-dire la longueur moyenne des lignes de courant du fluide traversant l'échantillon (L_e), sur la distance effective du déplacement L (longueur projetée du parcours d'un fluide en ligne droite), ou bien par le carré de ce rapport donné par Quénard (1991) [QUÉN 91] :

$$\tau = \left(\frac{L_e}{L}\right)^2$$

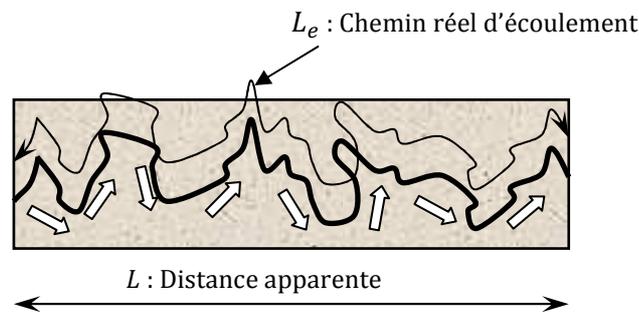


Fig. I-5. Schéma d'un cheminement tortueux dans une structure poreuse.

l'écoulement dans un milieu poreux dépend non seulement de la connectivité et de la tortuosité des pores dans le matériaux, mais la constrictivité du réseau poreux liée à la taille des pores (réduction ou augmentation de section des pores) peut également être un paramètre influençant sur la capacité d'un matériau poreux à être traversé par des fluides.

I.3. L'eau dans le béton

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, voir le plus important avec le ciment. En effet, l'eau intervient à toutes les étapes de vie du matériau par ces propriétés physico-chimiques [LAGH 06]. Ainsi, l'eau introduite dans le béton lors de sa fabrication va remplir deux fonctions essentielles: une fonction physique, qui confère au béton frais des propriétés rhéologiques d'un liquide (permettant donc son écoulement et le moulage), et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation [BILL 03]. Elle sert aussi à mouiller les granulats, et donc à assurer un bon lien avec la pâte de ciment [DALP 04].

Dans le béton, presque la moitié de l'eau de gâchage est consommée par les réactions d'hydratation, environ 40 % se trouve dans les pores des hydrates, 10 % se loge dans les vides présents dans la matrice [FERA 00]. Les mouvements d'eau peuvent entraîner des déformations de la matrice cimentaire (retrait ou gonflement). L'eau va donc jouer un rôle essentiel dans le comportement des matériaux durcis, non seulement sur le plan mécanique (résistance, retrait de dessiccation et fissuration induite dus à l'évaporation de l'eau des pores,...) mais sur celui de la durabilité, en régissant les transports au sein des matériaux, et en contrôlant les pénétrations des fluides de l'extérieur.

I.3.1. Classification de l'eau dans la pâte du ciment

L'eau introduite au cours de la fabrication est présente sous de multiples états dans le béton. L'eau étant constitutive du matériau, il est parfois difficile d'évaluer le degré de liaison de l'eau avec la matrice solide. En général trois degrés sont distingués :

I.3.1.1. L'eau libre dans les capillaires

C'est l'élément dans lequel s'effectuent les écoulements et les cisaillements lors de la mise en œuvre du béton [MASA 05]. Elle se trouve principalement dans les pores capillaires de dimension supérieure à 10 μm [REGO 82]. Cette eau est en excès par rapport à l'eau nécessaire pour l'hydratation et lors de l'évaporation ou de la dessiccation [BOUA 07], elle est la première à migrer et à s'éliminer. L'eau capillaire est constituée de la phase condensée remplissant le volume poreux au-delà de la couche adsorbée et séparée de la phase gazeuse par des ménisques (cf. Fig. I-6); elle obéit donc aux lois de capillarité (loi de Kelvin-Laplace) [BILL 03] présentée dans l'Eq. (I-1).

$$P_c = P_{atm} - P_b = \frac{2\sigma}{r} \cdot \cos\alpha \quad (\text{I} - 1)$$

Avec P_c la pression capillaire, P_{atm} la pression atmosphérique, P_b la pression du liquide, r le rayon du pore où le ménisque se forme, σ la tension superficielle de l'interface entre l'eau liquide et la phase gazeuse (cf. Fig. I-6) et α l'angle de mouillage.

La valeur de la pression capillaire dans le béton est fortement dépendante du niveau de saturation du béton et de la taille des pores. Elle influence la perméabilité du béton via la saturation.

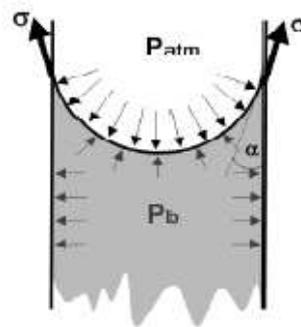


Fig. I-6. Schéma d'un capillaire.

Lorsque l'eau capillaire se trouve en équilibre avec la phase gazeuse par l'intermédiaire d'une interface plane, elle est appelée eau libre [ALNA 04]. Celle-ci est constituée de la phase condensée qui n'est plus sous le champ d'influence des forces superficielles [LAGH 06] (elle n'est pas soumise aux forces d'attraction des surfaces solides). Elle est présente dans les gros pores et s'évacue facilement du béton lors du séchage. C'est l'eau qui, à l'équilibre, quitte le béton lorsqu'on atteint la température conventionnelle de 105° C à 1 atm de pression.

I.3.1.2. L'eau adsorbée

Elle est le résultat de la condensation de l'eau vapeur sur la surface du solide formé par les grains du ciment et les granulats [OBER 86], [MENO 04]. Les molécules d'eau adsorbées sont soumises aux champs des forces électriques superficielles des particules de C-S-H et à l'action des forces d'attraction intermoléculaires de type de Van Der Waals d'intensité faible (énergie de l'ordre d'une dizaine de $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) [HAGE 04]. Sous l'influence de ces forces

d'attraction, les molécules d'eau sont physiquement adsorbées à la surface des solides dans la matrice cimentaire hydratée. Cette eau physiquement adsorbée est considérée comme l'eau la moins liée sur les surfaces externes des particules. Elle peut former jusqu'à 5 couches régulières et superposées [BADM 81], [BARO 82], [HAGY 69]. La cinquième couche a un statut proche de l'eau condensée. L'énergie de liaison avec le solide décroît lorsque l'on s'éloigne de la surface adsorbante [BENB 02]. L'apparition de cette liaison ne modifie pas la structure de la molécule d'eau d'où le terme d'absorption physique. Dès l'augmentation de la température, les liaisons se détruisent et les molécules d'eau se libèrent.

Une autre adsorption, de type chimique peut également apparaître entre la molécule d'eau et le solide notamment sur le gel C-S-H: L'eau est adsorbée chimiquement lorsqu'elle est combinée à d'autres composants dans les hydrates [BARO 94]. Alors, des électrons sont mis en commun entre l'eau et la surface solide. L'intensité des forces mises en jeu est moyenne (énergie de l'ordre d'une centaine de $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$). C'est l'eau adsorbée la plus liée. Ainsi, la structure de la molécule d'eau est modifiée (dissociation par rupture de la liaison covalente O-H) [REGO 82], [GUÉN 97]. Contrairement à l'adsorption physique, celle-ci a lieu uniquement dans des sites privilégiés (défauts cristallins par exemple) sur une couche d'eau au maximum [BENB 02];

I.3.1.3. L'eau chimiquement liée

C'est l'eau qui a été consommée au cours des réactions d'hydratation du ciment et qui est donc combinée avec d'autres composants à l'intérieur des hydrates (eau hydroxylique notamment). Elle réagit chimiquement avec le ciment pour former de nouveaux éléments tels que les C-S-H (silicates de calcium hydratés) et la portlandite ou l'ettringite. Ce sont des hydroxyles OH faisant partie de la structure des hydrates, liés chimiquement soit à des atomes *Si*, soit à des atomes *Ca*. Donc, l'eau chimiquement liée est une eau entièrement intégrée à la structure solide des hydrates.

➤ Eau dans les C-S-H

D'après les études menées sur la structure des C-S-H et à partir de multiples méthodes expérimentales, Sierra [SIER 74] identifie trois grandes classes d'eau dans les C-S-H, et les présente suivant l'ordre décroissant des énergies de liaisons. Ainsi nous retrouvons l'eau hydroxylique, l'eau interfeuillet et l'eau interlamellaire (cf. Fig. I-7).

- **L'eau hydroxylique** (groupement OH faisant partie de la structure des hydrates) appelée aussi l'eau chimiquement liée. Elle est liée soit à des atomes de silicium *Si* ou à des atomes de calcium *Ca*. Ces molécules sont placées sur les deux faces des feuillets (sur la surface interne et externe des feuillets) par une association d'un groupement hydroxyle. L'eau ainsi combinée figure presque à 23 % de la masse du ciment qui a réagi. Ces propriétés réalisent de cette eau, un constituant très stable qui ne se vaporise qu'assez durement. Elle ne peut être « gênée » que sous de strictes conditions de dessiccation (au four).
- **L'eau interlamellaire** est l'eau contenue dans les micropores, liée à la surface externe des feuillets ou à des molécules d'eau par des ponts hydrogènes. Cette eau est structurelle car elle est fixée à la surface des lamelles par un hydroxyle ou liée à d'autres molécules d'eau par liaisons de type Van der Waals.

- **L'eau interfeuille** (eau interfoliaire) possède un très faible degré de liberté. Ces molécules d'eau interfoliaires maintenues entre les feuillets de C-S-H sont liées triplement par des ponts d'hydrogènes avec les hydroxyles (cf. Figs. I-7 et I-8) où les liaisons sont dix fois plus intenses que les liaisons de Van der Waals ($80 \text{ à } 400 \text{ kJ.mol}^{-1}$, du même ordre qu'une réaction chimique); Elles interviennent directement dans la cohésion intrinsèque de la lamelle [BENB 02]. D'après Diamond [DIAM 86] seul un puissant séchage permet d'extraire ces molécules d'eau et ceci de manière irréversible.

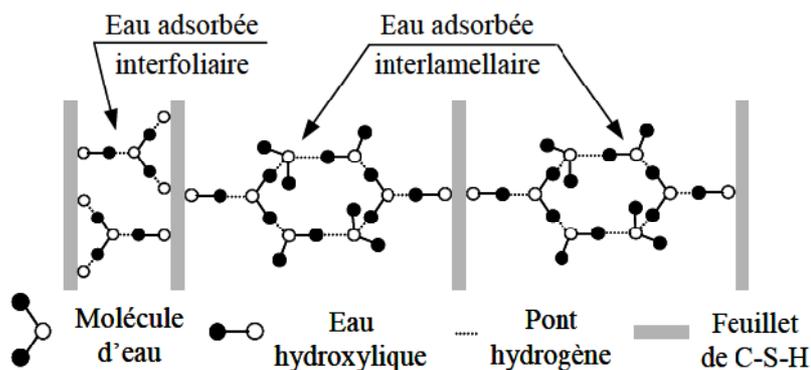


Fig. I-7. État de l'eau dans le gel de C-S-H selon Sierra [SIER 74] cité par Regourd [REGO 82].

D'après les études menées sur la structure des C-S-H, Baroghel-Bouny [BARO 94] donne une schématisation des types d'eau associés aux C-S-H avec deux exemples possibles pour la répartition de l'eau adsorbée à la surface des C-S-H (cf. Fig. I-8).

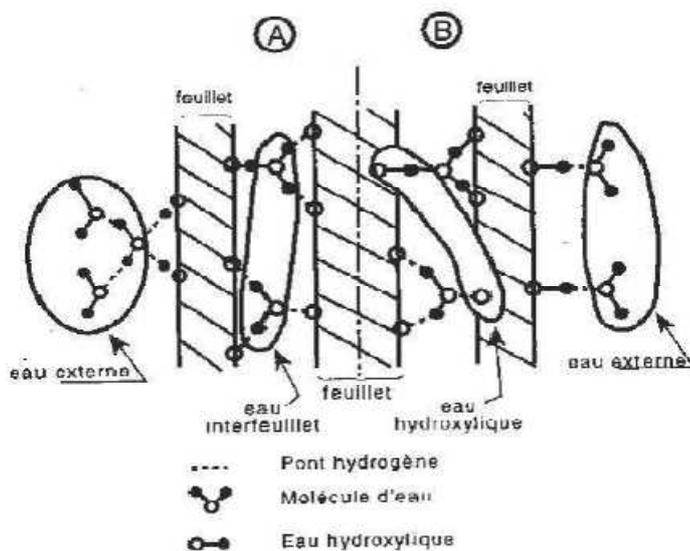


Fig. I-8. Illustration de la répartition de l'eau adsorbée à la surface des C-S-H, dont A et B sont deux exemples possibles [BARO 94].

➤ Eau dans les zones d'adsorption empêchée

Sur une surface plane, l'eau est librement adsorbée jusqu'à une épaisseur de 5 molécules pour une humidité relative proche de l'unité. Le diamètre d'une molécule d'eau étant d'environ $2,6 \text{ \AA}$ ce qui donne une épaisseur de la couche d'adsorption de 13 \AA . Il faudrait

donc que l'espace interlamellaire soit de 26 Å pour que l'adsorption physique se déroule de manière libre. Cet espace n'étant en réalité que de 17 Å, alors, l'eau ne peut être adsorbée librement puisque les surfaces adsorbantes sont trop proches. Alors, cette région est appelée zone d'adsorption empêchée (cf. Fig. I-9). L'eau y est présente sous une forte pression, de l'ordre de 130 MPa [BAZA 72], dite de disjonction. Cette pression s'oppose aux forces d'attraction qui existent entre particules solides des C-S-H et qui permettent le maintien de la structure du squelette. Cette eau est ainsi un élément structural à part entière du matériau, capable de transmettre localement les contraintes.

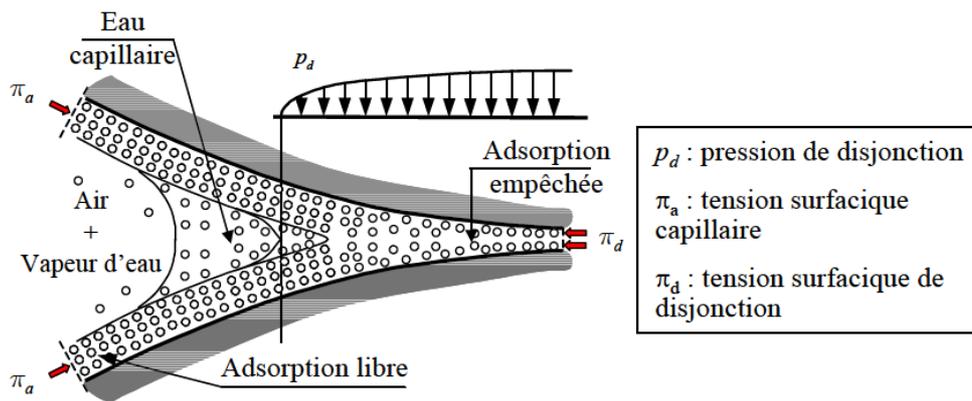


Fig. I-9. Description idéalisée de l'eau dans les zones d'adsorption empêchée et de la transition avec les pores capillaires [BAZA 72].

Il faut cependant noter que cette distinction de l'eau en catégories n'est pas très bien définie. Brouwers (2004) [BROU 04] quant à lui, fait une distinction entre l'eau évaporable (dite : « libre ») et l'eau non-évaporable (dite : « liée ou non-libre »).

L'eau non-évaporable comprend l'eau adsorbée la plus liée (l'eau interfeuillet ou adsorbée chimiquement) et l'eau chimiquement liée, contrairement à l'eau libre (eau capillaire) et celle adsorbée la moins liée (adsorbée physiquement), qui sont évaporables (cf. Fig. I-10) [BARO 1994].

L'eau évaporable provient pour une part, des pores capillaires et d'autre part, des pores du gel. Pour un ciment bien hydraté, l'eau non évaporable est d'environ 18 % de la masse du matériau anhydre ; ce pourcentage monte à environ 23 % pour un ciment complètement hydraté [CISM 03]. La proportion entre la quantité d'eau non évaporable et le volume solide de la pâte de ciment peut être utilisée pour mesurer la quantité de gel de ciment (i.e. le niveau d'hydratation) [DALP 05]. De même, il est courant de distinguer deux types d'eau sur des courbes d'analyses thermiques en considérant une température seuil autour de 100° C [ALON 04]. La perte d'eau en dessous de cette température correspond à l'évaporation d'eau libre, alors que la perte d'eau entre 100 et 200° C correspond à l'eau liée des C-S-H. Toutefois, certains produits hydratés telle que l'ettringite perdent la majorité de leur eau structurale dès 80° C.

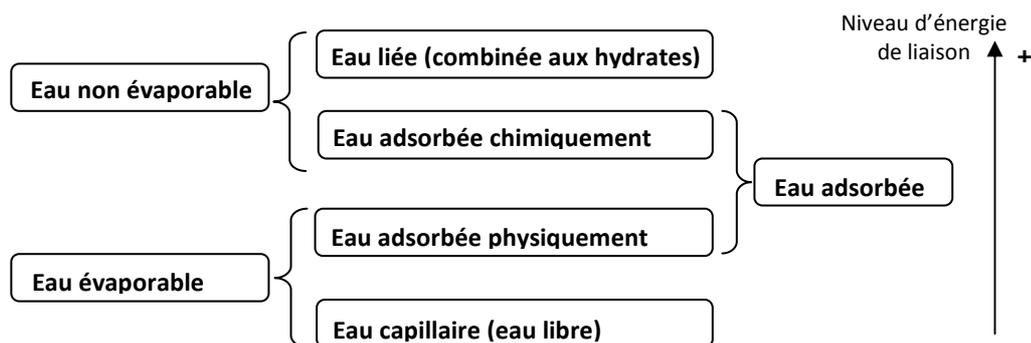


Fig. I-10. Différentes formes d'eau dans le matériau cimentaire [DELM 04].

I.3.2. Observations sur le comportement hydrique du béton

I.3.2.1. Le séchage à température ambiante

Le béton est naturellement saturé en eau quand il sort d'une cure humide, puisque l'eau utilisée lors de sa confection est bien supérieure à celle nécessaire à son hydratation [POWE 53]. Cette eau libre en excès se retrouve à l'intérieur des pores et y reste tant que le béton est en équilibre hydrique avec l'ambiance de conservation. Lorsque ce n'est plus le cas, plusieurs moteurs conditionnent l'écoulement de cette eau vers les surfaces libres pour s'évaporer après. En effet, l'exposition d'une structure en béton à une humidité relative environnante, inférieure à celle régnant au sein du matériau est à l'origine d'un choc hydrique et d'un déséquilibre hygrométrique. Ce déséquilibre se traduit par un mouvement de l'eau de l'intérieur du matériau vers l'extérieur, conduisant à son séchage. Ainsi, le mécanisme moteur du séchage est le gradient d'humidité relative induit au sein du matériau, en termes de répartition de l'eau à l'état vapeur au sein du matériau. De plus, l'humidité relative locale influence de façon très importante les propriétés de transfert comme la diffusivité et la perméabilité.

Le séchage de la pâte de ciment durcie est complexe, du fait que l'eau présente dans la pâte de ciment est sous sa phase liquide et gazeuse. L'équilibre thermodynamique entre les phases vapeurs et liquides doit être en effet maintenu. Le séchage fait intervenir de multiples mécanismes complexes, qui se produisent de façon plus ou moins couplés [COUS 01], [DAÏA 01], [MAIN 01a]. Les phénomènes de perméation, diffusion, adsorption-désorption, condensation-évaporation (cf. Fig. I-11, § I.3.2.3 et § I.3.5) sont alors mis en jeu dans la pâte de ciment.

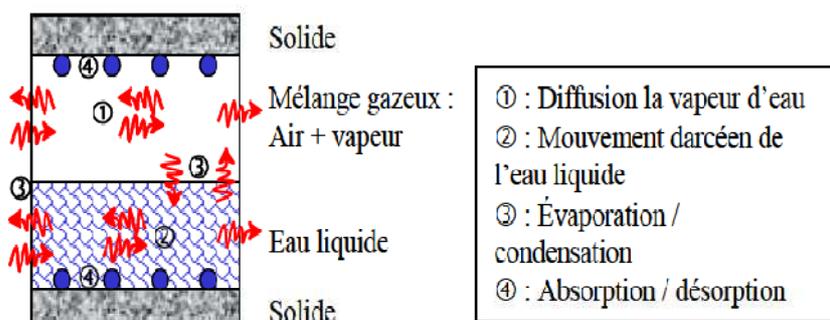


Fig. I-11. Représentation schématique des mécanismes de transport de l'eau au sein de la pâte de ciment [BENB 02].

I.3.2.2. Effet de la température sur le transport de l'eau

Concernant le transport de l'eau en température, de nombreux travaux montrent une accélération du séchage en température et une augmentation des propriétés de transfert avec la température [HUGH 66], [HANC 68], [WONG 01]. Soulignant les travaux récents de Brue (2009) [BRUE 09], la cinétique de désaturation à 20, 50 et 80° C d'un béton à base de ciment CEM V est tracée à partir du suivi des pertes de masse (cf. Fig. I-12). Il apparaît que pour une humidité relative h_r donnée, l'équilibre hydrique est atteint beaucoup plus rapidement à 80° C qu'à 50° C puis 20° C. Par exemple à 60 % de h_r , plus de 200 jours sont nécessaires pour que l'équilibre hydrique soit atteint à 20° C, contre moins de 100 jours à 80° C. Les résultats de Poyet (2009) [POYE 09], montrent également une durée nécessaire pour atteindre l'équilibre, beaucoup plus élevée à 30° C qu'à 80° C : à 80° C un mois est requis pour atteindre 90 % de la perte de masse totale, contre un an à 30° C. Dans ce sens Cerny *et coll.* (2001) [CERN 01] montrent, à l'aide d'un essai d'imbibition, que le coefficient d'adsorption d'eau peut quasiment doubler de 5 à 80° C pour un béton ordinaire.

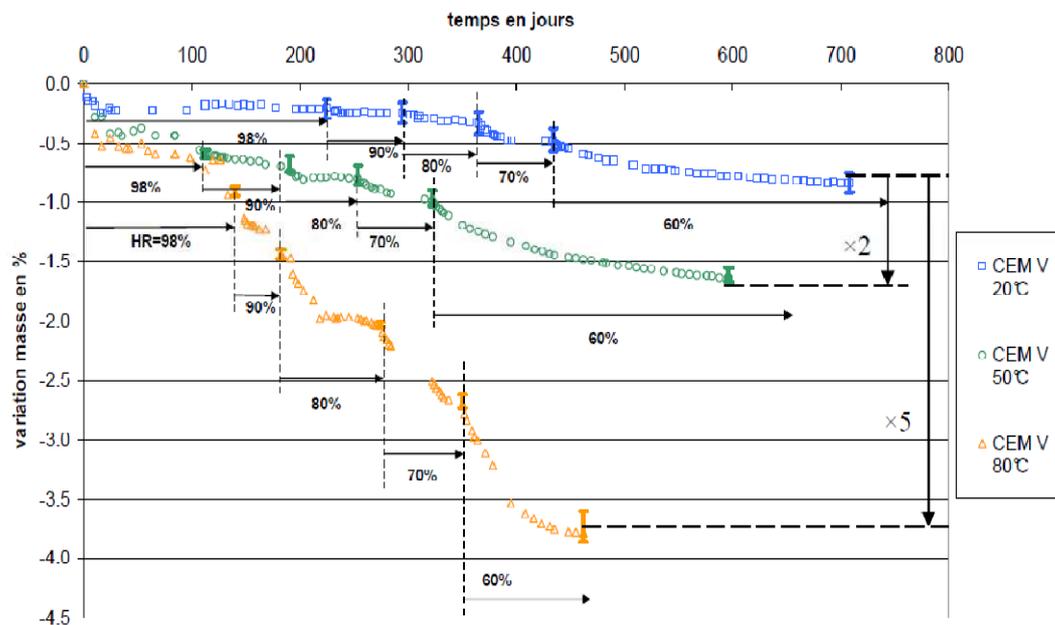


Fig. I-12. Cinétique de désaturation d'un béton à base du ciment CEM V en fonction de la température [BRUE 09].

Outre le coefficient d'adsorption d'eau et le coefficient de diffusion, la perméabilité à l'eau liquide constitue un bon outil d'évaluation pour quantifier et prévoir l'aptitude des bétons au transport d'humidité.

I.3.2.3. Diffusivité hydrique dans le béton

Dans les structures des bâtiments, les transferts internes d'humidité peuvent se développer en phase gazeuse et/ou liquide [DAÏN 86], [MOYN 87], [BAST 89]. La nature et l'intensité de ces transferts à l'échelle macroscopique dépendent des propriétés intrinsèques des matériaux utilisés qui peuvent induire des phénomènes particuliers. Néanmoins, trois mécanismes prédominants de migration de l'eau se dégagent [XI 94] :

a) La diffusion moléculaire

Les matériaux poreux peuvent être définis par leur capacité à adsorber, retenir et désorber l'eau (capacité hygroscopique). Selon l'état hydrique du matériau poreux, les mécanismes d'adsorption peuvent se produire soit par adsorption surfacique (chimisorption ou physisorption), soit par condensation capillaire. L'adsorption se poursuit jusqu'à ce que la couche de molécules d'eau soit en équilibre thermodynamique avec la phase gazeuse. La quantité adsorbée sur les parois des pores dépend de la température et de la pression partielle de la vapeur d'eau contenue dans les pores. Selon l'état hydrique du matériau poreux, le transfert d'humidité peut être engendré par les actions indépendantes ou simultanées des processus de perméation (écoulement liquide et/ou gazeux) et de diffusion (liquide ou vapeur) (cf. § I.2.5). En état de saturation l'écoulement est conditionné par l'existence d'un gradient de pression hydrostatique. En conditions insaturées, la phase gazeuse et la phase liquide cohabitent, et les deux modes de transport (écoulement et diffusion) peuvent se superposer. Ces deux modes de transport sont décrits respectivement par les lois de Darcy et de Fick.

• **Flux d'humidité dans un matériau saturé**

Lorsque le degré de saturation atteint 100 %, le réseau poreux connecté forme une phase capillaire continue. En admettant que la phase liquide soit incompressible, le transport ne sera que de type Darcéen (mouvement Darcéen de l'eau liquide). Par ailleurs, dans les matériaux cimentaires ayant une faible porosité, la vitesse des fluides dans le réseau poreux est faible et l'écoulement peut être supposé laminaire (cf. § I.3.5.2 et § II.2.2.4).

• **Flux d'humidité dans un matériau insaturé**

Lorsque le matériau est soumis au séchage, le matériau passe dans un état d'insaturation. La présence simultanée d'eau liquide et d'eau vapeur provoque le transport d'eau par perméation et/ou diffusion. Selon le degré de saturation du matériau (lorsque h_r de l'air ambiant augmente de 0 à 1), l'adsorption d'eau peut être divisée en 3 étapes : une étape d'adsorption monomoléculaire, une étape d'adsorption multimoléculaire et une étape de condensation capillaire (cf. Fig. I-13). Avec la condensation capillaire, des chercheurs comme Goual *et coll.* [GOUA 06], Tranle [TRAN 10] et Collet *et coll.* [COLL 11] pensent que l'adsorption de molécules d'eau sur la paroi des pores joue un rôle importante dans la sorption de matériaux poreux lorsque l'humidité relative n'est pas très importante ($h_r < 0,4$).

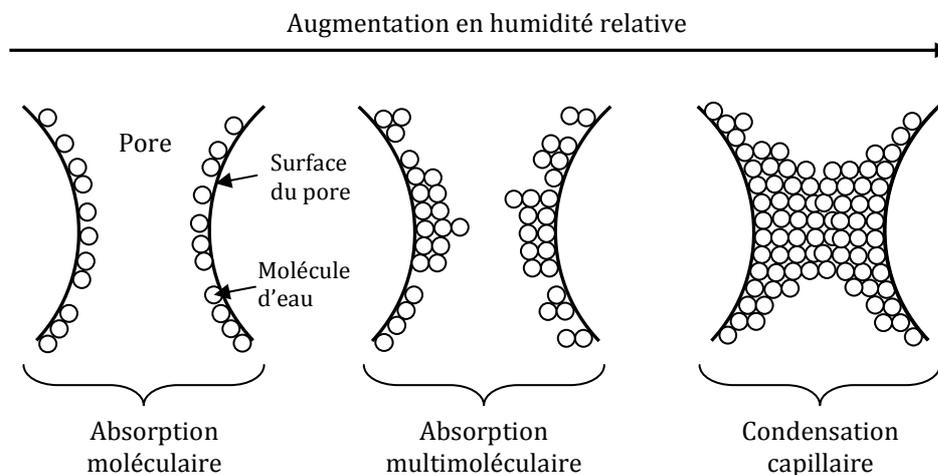


Fig. I-13. Schématisation du processus d'adsorption lorsque l'humidité relative ambiante augmente [COLL 11].

➤ *Etape d'adsorption monomoléculaire*

Lorsque l'humidité relative est faible ($h_r < 20\%$), la phase liquide n'existe que par l'adsorption physique d'un film d'eau sur les parois des pores. Les molécules de vapeur d'eau sont fermement adsorbées sur la paroi des pores sous l'effet des forces de Van der Waals. Une migration des molécules d'eau du film s'ajoute donc à la diffusion gazeuse. Pour des humidités relatives encore plus faibles (moindres que 10%), le film d'eau se réduit à l'adsorption d'une couche uniquement monomoléculaire et dans ce cas seulement la diffusion gazeuse est possible.

➤ *Etape d'adsorption multimoléculaire*

Lorsque l'humidité relative est plus importante ($20\% < h_r < 75\%$), les molécules d'eau se forment sur la paroi des pores en multicouches : la deuxième couche de molécules d'eau s'adsorbe sur la première couche, ensuite, la troisième couche s'adsorbe sur la deuxième couche, etc. Alors, il se produit une adsorption pluri-moléculaire. On estime à 6 couches, le maximum de couches adsorbées les unes sur les autres [MEHT 06].

➤ *Etape de condensation capillaire*

Lorsque l'humidité relative est très importante (plus que 75%), un ménisque se forme à chaque extrémité des cols reliant les macropores (cf. Figs. I-13 et I-14). Ce ménisque sur l'interface entre l'eau liquide et l'air, donne la condensation capillaire à cause de la différence entre l'humidité relative au-dessus du ménisque et l'humidité relative de l'air ambiant. Alors, les multicouches se joignent et forment un pont liquide jusqu'à remplir l'espace poreux. Il y a alors saturation et écoulement dans la phase condensée (cf. Fig. I-14).

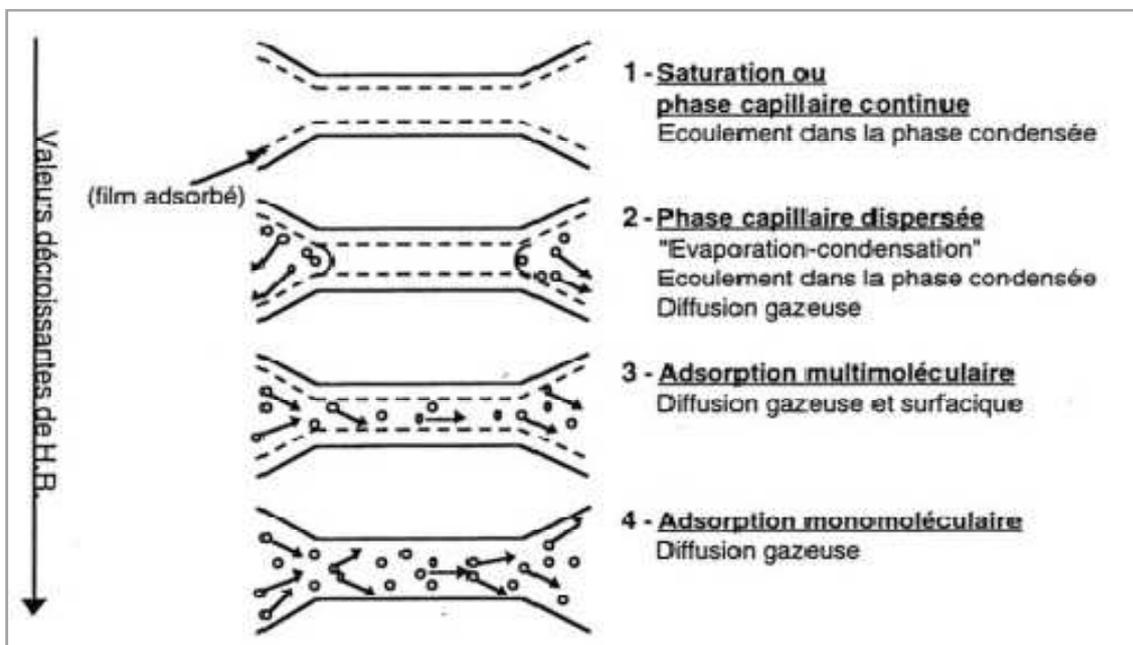


Fig. I-14. Schématisation du processus de désorption lorsque l'humidité relative ambiante diminue [BARO 94].

Par ailleurs, lorsque le nombre de couches d'eau adsorbée augmente, l'espace disponible à la vapeur d'eau pour diffuser diminue et donc la résistance au transport augmente. D'autre part, les forces d'attraction de la surface du solide diminuent et donc la résistance au transport diminue. Étant donné qu'une partie du transport de l'eau se fait sous phase

vapeur, lorsque l'humidité relative dépasse une valeur seuil, les processus de condensation et d'évaporation aux extrémités des cols accélèrent fortement le processus de diffusion. Ce mécanisme est dominant pour des pores de dimension 50 nm – 10 µm [XI 94], ce qui correspond typiquement à la taille des pores capillaires.

b) La diffusion de Knudsen

Les nanopores (de dimension inférieure à 50 nm) constituent une grande partie des pores de la pâte de ciment [BENB 02]. Les dimensions de ces pores sont plus faibles que le libre parcours moyen des molécules d'eau (environ 80 nm). Donc cette situation limite apparaît lorsque le libre parcours moyen est supérieur au diamètre du capillaire. On parle alors d'écoulement libre des molécules (*free molecular flow*) ou plus communément de « débit de Knudsen » [BILL 03]. Les collisions entre les molécules, ainsi que les collisions contre les parois des pores constituent alors la principale source de résistance à la diffusion des molécules d'eau (cf. Fig. I-15a).

c) La diffusion surfacique

Ce mécanisme a lieu aussi dans les nano-pores, où les molécules d'eau sont soumises aux champs de force des parois des pores. Certaines molécules gazeuses entrent en collision avec la paroi des pores, restent ainsi adsorbées un certain temps et se désorbent par la suite [CARM 56]. Le processus de transport est gouverné par les sauts des molécules d'eau entre les sites d'adsorption (cf. Fig. I-15b). Ce mécanisme a lieu principalement lorsque l'eau présente est essentiellement adsorbée, ce qui est le cas lorsque l'humidité relative est faible [XI 94]. L'influence de cet écoulement sur le débit permanent de masse et de glissement est souvent négligée du fait du faible volume de cette couche adsorbée par rapport au volume poreux total [PERR 92]

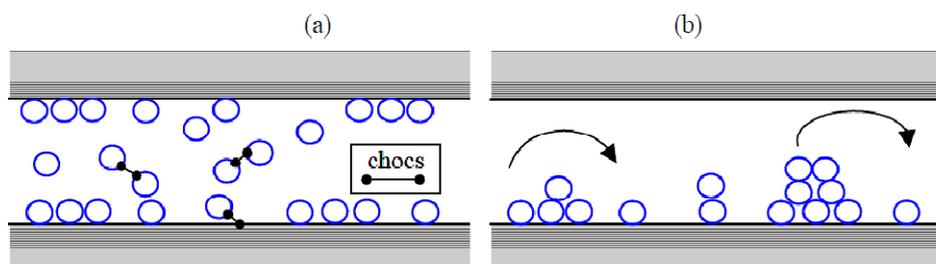


Fig. I-15. La diffusion de Knudsen (a) et la diffusion surfacique (b) [XI 94].

I.3.3. Compréhension des interactions eau-matrice : Isotherme de sorption

Le séchage des matériaux à matrice cimentaire met en jeu d'importants gradients de teneur en eau qui peuvent être mise en évidence par des expériences de sorption isotherme. Dans ces expériences, l'humidité relative h_r est contrôlée, tandis que le degré de saturation S_l ou la teneur en eau w sont mesurés. Les isothermes de sorption $h_r = h_r(S_l)$ ou $h_r = h_r(w)$ représentent à une température donnée et à l'équilibre, la quantité d'eau évaporable en fonction de l'humidité relative externe. Sorption est le terme général : l'état d'adsorption décrit la pénétration et l'enrichissement en adsorbant (vapeur d'eau par exemple) sur un adsorbant (le matériau cimentaire), et celui de désorption correspond à sa réduction [ATKI 06], [ISHI 07]. Alors, les isothermes de désorption et d'adsorption physique d'un gaz (de vapeur d'eau par exemple) permettent de quantifier les interactions eau-matrice et les interactions liquide-vapeur.

En maintenant la température constante, si l'on fait varier l'humidité relative d'une enceinte climatique dans laquelle un échantillon de béton est placé, le matériau sèche ou s'humidifie. Une augmentation d'humidité relative environnante crée un gain de poids (adsorption) et une diminution d'humidité relative correspond à une évaporation d'eau liquide créée une perte de poids (désorption). La stabilisation du poids à chaque valeur d'humidité relative imposée permet d'obtenir l'isotherme d'adsorption ou de désorption. Si la courbe est obtenue quand l'humidité relative croît, nous l'appelons isotherme d'adsorption (gain de poids par humidification), à l'inverse, quand l'humidité relative décroît, nous l'appelons isotherme de désorption (perte de poids par séchage). Le schéma général d'une isotherme de sorption est représenté sur la Fig. I-16 pour un béton ordinaire [GREG 82]. Les isothermes rendent compte des modes d'adsorption des matériaux poreux précédemment décrits (cf. Fig. I-13 et § I.4.2.3).

La comparaison des résultats obtenus en désorption et en adsorption met en évidence l'existence d'une importante hystérésis entre les deux courbes [BARO 97]. Cette boucle d'hystérésis est expliquée par la structure des pores elle-même (la complexité du réseau poreux) [HARM 65] et à la présence d'une condensation capillaire discontinue dans les pores [GRUS 01].

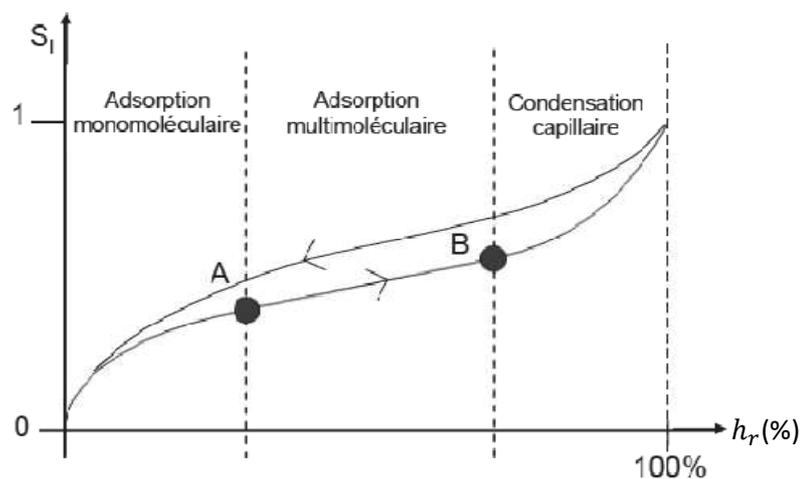


Fig. I-16. Isotherme de désorption d'un béton ordinaire [GREG 82].

Aux faibles h_r (entre l'origine et le point A), les molécules d'eau se fixent sur chacun des sites disponibles au sein des pores pour former une couche monomoléculaire exclusivement surfacique. Au point A, la monocouche est complète (tous les sites sont occupés). Entre les points A et B, plusieurs couches sont susceptibles de se former, l'adsorption est multimoléculaire (cf. Figs. I-13 et I-14). Au-delà du point B, tout le réseau est rempli d'eau liquide. L'incurvation à forte humidité relative de l'isotherme est caractéristique des phénomènes de condensation capillaire [CARM 51].

L'isotherme de sorption dépend de la distribution des pores du milieu poreux. Pour ce milieu initialement sec, les pores plus petits vont être remplis plus tôt et les pores plus grands vont être remplis plus tard lorsque l'humidité relative de l'air ambiant augmente. Pour le milieu poreux initialement saturé, les pores plus grands vont être vidés plus tôt et les pores plus petits vont être vidés plus tard lorsque l'humidité relative de l'air ambiant diminue.

Pour des bétons ordinaires, dans le domaine des faibles humidités (< 40 %), l'isotherme est quasiment indépendante de la formulation puisque la porosité concernée n'est probablement pas très éloignée d'un béton à l'autre. Par contre pour les fortes humidités, c'est la composition et plus particulièrement la finesse du réseau poreux qui va conditionner l'isotherme. La Fig. I-17 rassemble les résultats de première désorption de trois types de béton à partir des études de Pihlajavaara, de Baroghel Bouny et de Verdier [PIHL 82], [BARO 04a], [VERD 01]. Les allures des isothermes restent similaires et les valeurs de la saturation à l'équilibre sont proches pour des bétons relativement comparables.

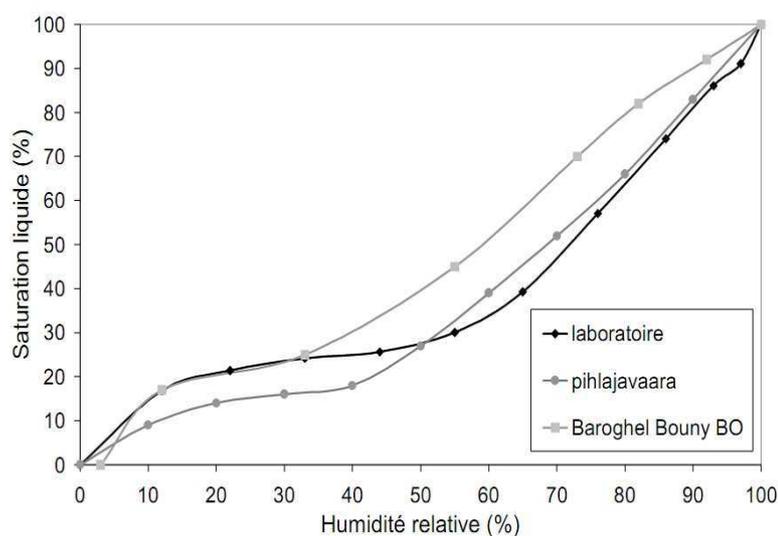


Fig. I-17. Isothermes de première désorption pour différents bétons [VERD 01] (Pihlajavaara pour un béton de $E/C=0.5$; Baroghel Bouny pour un béton ordinaire de $E/C=0.48$ et Verdier pour un béton de $E/C=0.48$).

Les isothermes de sorption sont donc des courbes donnant les valeurs à l'équilibre thermodynamique de la teneur en eau (évaporable) du matériau en fonction de l'humidité relative de l'air ambiant (du milieu) pour une température fixée. Elles fournissent une véritable carte d'identité « hydro-structurale » du matériau poreux à l'équilibre [BARO 94], [BARO 07a], [BARO 07b].

À partir des expériences réalisés sur une très large gamme de matériaux depuis vingt ans et incluant des cycles dans différents domaines d'humidité relative, une base de données a été constituée, dans le but notamment d'analyser le phénomène d'hystérésis et l'influence des paramètres de formulation, de la température, et des dimensions des échantillons [BARO 07a]. Ces données sont d'un intérêt majeur pour la compréhension du comportement hydrique des matériaux à base du ciment. Elles permettent notamment le calcul de coefficients de diffusion hydrique (cf. § I.3.5.1) et de la perméabilité à l'eau liquide (cf. § I.3.5.2 et § II.2.2.2). Ces données sont en outre indispensables pour la modélisation des transferts de masse (eau, ions, ...etc.).

I.3.4. Expression de la pression capillaire

À l'échelle d'un pore, lorsque l'eau liquide et le gaz coexistent, ces deux phases sont séparées par une interface courbe [BILL 03]. La pression est discontinue à la traversée de cette interface et la différence des pressions entre la phase non mouillante (P_g : pression totale de

gaz (Pa)) et la phase mouillante (P_l : pression totale de l'eau liquide (Pa)) s'appelle la pression capillaire P_c :

$$P_c = P_g - P_l \quad (P_c \geq 0) \quad (\text{I-2})$$

Cette "dépression" capillaire ($-P_c$) est reliée à l'humidité relative par l'intermédiaire de l'équation bien connue de Kelvin (cf. Eq. (I-3)). Lorsque le mélange gazeux, composé d'air sec et de vapeur d'eau, est en équilibre avec l'air extérieur et est donc à la pression atmosphérique, la loi de Kelvin s'écrit sous la forme :

$$-P_c = \frac{\rho_l \cdot RT}{M_v} \cdot \ln h_r \quad \text{avec : } \left(h_r = \frac{P_v}{P_{vs}} \right) \quad (\text{I-3})$$

Où ρ_l , R , T , M_v sont respectivement la masse volumique de l'eau liquide supposée incompressible (kg/m^3), la constante des gaz parfaits ($8,3144 \text{ J/mol.K}$), la température absolue (K) et la masse molaire de la vapeur (kg/mol). Ainsi, h_r est l'humidité relative définie comme le rapport de la pression de vapeur (P_v) à la pression de vapeur saturante dans le milieu à la température considérée (P_{vs}).

Dans une expérience de désorption isotherme, l'humidité relative h_r est contrôlée, tandis que le degré de saturation S_l est mesuré par pesée. À température donnée et à l'équilibre, l'humidité relative peut être ainsi expérimentalement déterminée en tant que fonction de S_l : c'est l'isotherme de désorption $h_r = h_r(S_l)$. La loi d'équilibre de Kelvin (Eq. (I-3)) permet d'en déduire la pression capillaire en tant que fonction du degré de saturation en eau liquide : c'est la courbe de pression capillaire $P_c = P_c(S_l)$. C'est généralement une courbe monotone décroissante du degré de saturation. La pression capillaire décroît d'une valeur maximum pouvant être infinie à une valeur minimum dite pression d'entrée d'air qui, lors d'un drainage est la pression capillaire au-delà de laquelle la saturation en eau liquide diminue effectivement. Dans le cas des matériaux peu perméables comme les bétons, quand la saturation en eau décroît, la pression capillaire devient trop élevée. Des résultats expérimentaux de cette nature [BARO 94], [BARO 99] sont reproduits sur la Fig. I-18 pour un béton ordinaire de ciment portland (BO) avec un rapport $E/C = 0,48$.

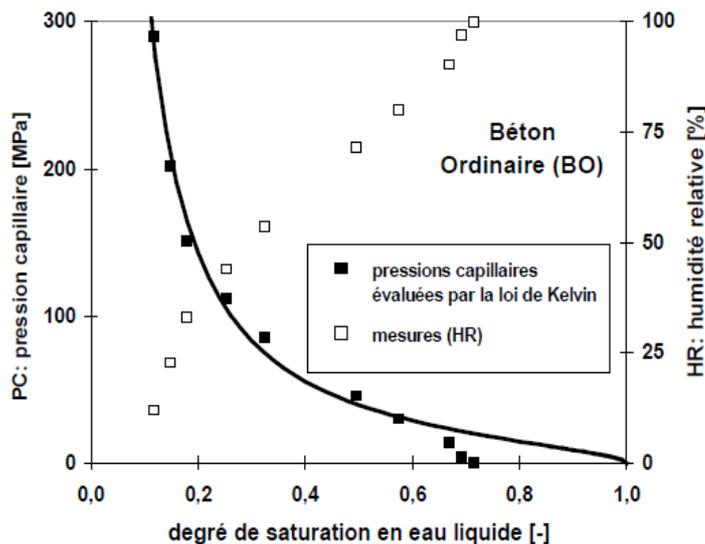


Fig. I-18. Courbe de pression capillaire déduite de l'isotherme de sorption [BARO 94], [BARO 99].

Ces résultats montrent que pour une humidité relative de l'ordre de 75 %, la pression capillaire ainsi déterminée atteint les 50 MPa.

I.3.5. Propriétés de transport - Coefficients de diffusion et perméabilités

I.3.5.1. Coefficient de diffusion hydrique

Outre les propriétés hydriques d'équilibre (cf. § I.3.3) et les caractéristiques de la structure poreuse (cf. § I.2.4), les propriétés de transport (coefficients de diffusion et de perméabilité) peuvent être quantifiées à partir des expériences de désorption et d'adsorption de vapeur d'eau. Par exemple, le coefficient de diffusion hydrique apparent D_a peut être directement déduit, sous certaines hypothèses, de l'analyse des courbes de variation relative de masse en fonction du temps, associées à chaque palier d'humidité relative réalisé pour obtenir les isothermes de désorption et d'adsorption de vapeur d'eau par la méthode des solutions salines saturées (cinétiques de désorption et d'adsorption de vapeur d'eau) [BARO 94], [PERR 98], [BARO 07b]. D_a est le coefficient de transport global, fonction de h_r , qui intervient dans l'équation de diffusion non linéaire (équation de Richards, écrite en unidimensionnel selon la coordonnée spatiale x dans l'Eq. (I-4)) régissant le transport d'humidité (et par exemple plus particulièrement l'évolution du taux de saturation en eau liquide S_l) en conditions partiellement saturées ou non stationnaires [BARO 08] [DROU 10]:

$$\frac{\partial S_l}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D_a(S_l) \frac{\partial S_l}{\partial x} \right) = 0 \quad (\text{I} - 4)$$

Cette équation (Eq. (I-4)) est classiquement introduite en invoquant deux hypothèses principales. Tout d'abord, le transport d'humidité en phase gazeuse (de vapeur d'eau) est supposé purement diffusif (i.e. l'écoulement convectif du gaz est négligé devant la diffusion de vapeur d'eau). Ensuite, la pression totale du gaz au sein du matériau (air sec + vapeur d'eau) est supposée (presque) constamment égale à la pression atmosphérique pendant l'échelle du temps de séchage. Sous ces deux hypothèses, Mainguy [MAIN 99], sur la base des travaux de Philip et De Vries [PHIL 57] et de travaux plus récents par [DAIA 88], [COUS 95], a montré que le coefficient de diffusion hydrique apparent $D_a(S_l)$ s'exprimait sous la forme d'une somme de deux termes (Eq. (I-5)):

$$D_a(S_l) = D_l(S_l) + D_v(S_l) \quad (\text{I} - 5)$$

Avec :

$$D_l(S_l) = - \frac{dP_c}{dS_l} \cdot \frac{K_l}{P_{eau} \cdot \mu_l} K_{rl}(S_l) \quad (\text{I} - 6)$$

et

$$D_v(S_l) = - \frac{dP_c}{dS_l} \cdot \left(\frac{M}{\rho_l \cdot RT} \right)^2 \cdot D_{v0} \cdot f(S_l, P_{eau}) \frac{P_{vs}}{P_{eau}} \cdot \exp \left(\frac{M}{\rho_l \cdot RT} P_c(S_l) \right) \quad (\text{I} - 7)$$

Où $K_{rl}(S_l)$ est la perméabilité relative à l'eau liquide (cf. § II.2.2.7), K_l est la perméabilité "intrinsèque" à l'eau liquide (c.à.d. perméabilité du matériau saturé), théoriquement indépendante du fluide, P_c est la pression capillaire, P_{eau} est la porosité accessible à l'eau du matériau, μ_l est la viscosité dynamique de l'eau liquide, R est la constante des gaz parfaits, M est la masse molaire de l'eau, ρ_l est la densité de l'eau liquide, et P_{vs} est la pression de

vapeur saturante à la température T considérée. Les Eqs. (I-5), (I-6) et (I-7) indiquent que, en sus des interactions vapeur d'eau – eau liquide – matrice (sorption), le transport total de l'humidité en fonction de la saturation du matériau ($D_a(S_l)$) inclut implicitement deux modes de transport de l'humidité, qui sont couplés et qui agissent simultanément sous l'hypothèse de pression de gaz constante :

- Le transport (convectif) de l'eau liquide selon la loi de Darcy, régi par la perméabilité du milieu non saturé K_l . $K_{rl}(S_l)$. Le terme $D_l(S_l)$ est associé à ce mode de transport.
- Le transport (diffusif) de la vapeur d'eau (du gaz) selon la loi de Fick, régi par le coefficient de diffusion effectif de la vapeur d'eau dans le milieu poreux ($D_{ve}(S_l) = D_{v0} \cdot f(S_l, P_{eau})$), où D_{v0} est le coefficient de diffusion libre (hors milieu poreux) de la vapeur d'eau dans l'air et $f(S_l, P_{eau})$ est le facteur de résistance, qui prend en compte à la fois les effets de tortuosité et la réduction de l'espace offert à la diffusion du gaz dans un milieu poreux partiellement saturé, comparé à la diffusion libre dans l'air. Le terme $D_v(S_l)$ est associé à ce mode de transport.

Selon le matériau considéré et son état de saturation, un processus ou l'autre peut être prépondérant. Dans le cas général, la diffusion de la vapeur d'eau prédomine dans le domaine des faibles valeurs de S_l , tandis que le transport sous forme liquide est prépondérant dans le domaine des valeurs élevées de S_l , pour les mêmes raisons qui expliquent l'évolution des perméabilités relatives à l'eau liquide et aux gaz en fonction de S_l (cf. § II.3.3 et Fig. II-22). Cependant, dans le cas de la vapeur d'eau, le problème est plus complexe (que dans le cas de l'azote ou de l'oxygène par exemple), vu que sous les hypothèses précédemment mentionnées, son transport est couplé à celui de l'eau liquide. Les variations de coefficient de diffusion hydrique apparent (D_a) observées en fonction de S_l peuvent donc s'expliquer par les variations en fonction de S_l observées sur D_v dans le domaine $0 \leq S_l \leq 0.5$ [BARO 07b] et sur la perméabilité relative à l'eau (K_{rl}) dans le domaine $0.5 \leq S_l \leq 1$ (cf. Fig. II-24). De plus, le minimum observé expérimentalement pour D_a est cohérent avec la diminution, dans le domaine des S_l intermédiaires, des deux coefficients, et donc du transport global (convectif + diffusif). Ce minimum correspond à la transition entre un transport dominé par un écoulement de Darcy à des S_l élevés, et un transport dominé par la diffusion de vapeur d'eau à des S_l faibles, et résulte du fait que la diffusion de vapeur augmente quand le degré de saturation (S_l) diminue, compte tenu de la diminution du nombre de pores bloqués par la phase liquide discontinue.

On peut en conclure qu'il apparait plus approprié, pour une meilleure compréhension des processus de transport de l'humidité, et en particulier pour étudier la contribution relative de chaque mode de transport en fonction de la structure poreuse et du taux de saturation, d'évaluer $D_v(S_l)$ et K_l . $K_{rl}(S_l)$ séparément, au lieu de mesurer un coefficient global.

En l'état des connaissances et de la pratique (absence de méthode harmonisée et validée), il a donc été conclu que les coefficients de diffusion hydriques ne pouvaient, de façon générale, être considérés comme des indicateurs de durabilité [BARO 08]. Néanmoins, lorsque la signification physique et les conditions d'essai sont bien maîtrisées, ces coefficients peuvent être très utiles pour l'analyse des mécanismes de transfert hydrique.

I.3.5.2. Perméabilité aux gaz et aux liquides – Loi de Darcy

La perméabilité quantifie l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide sous gradient de pression totale. La vitesse de filtration \vec{v} (en m/s) d'un fluide régie par la loi de

Darcy (généralisée pour des matériaux poreux à différents taux de saturation) s'écrit, en négligeant les effets de gravité et les effets dynamiques, selon l'Eq. (I-8):

$$\vec{v} = -\frac{K}{\mu} \cdot K_r(S_l) \cdot \vec{\nabla}P \quad (\text{I} - 8)$$

Où $\vec{\nabla}P$ représente le gradient de pression du fluide auquel est soumis l'échantillon du matériau, K_r est la perméabilité relative du fluide percolant (qui est fonction du taux de saturation en eau liquide S_l), μ est la viscosité dynamique du fluide et K est la perméabilité "intrinsèque" du matériau qui est théoriquement indépendante des phases saturantes. Plus de détails sont présentés dans le chapitre II concernant la perméabilité intrinsèque et la perméabilité relative à l'eau et au gaz du béton en fonction de degré de saturation.

I.4. Conclusion

Les processus de transport des différentes espèces, qui ont lieu dans le béton, sont régis par la loi de Darcy. Celui intervenant le plus systématiquement est certainement le transport de l'eau liquide lors du séchage naturel du béton.

Lorsque les transferts de fluides dans le béton sont susceptibles d'avoir lieu sous formes gazeuse et liquide, il est important de quantifier à la fois la perméabilité aux gaz et celle aux liquides, notamment à l'eau (étant donné que dans la pratique on n'a pas forcément coïncidence entre ces deux paramètres pour les bétons, avec les méthodes de détermination utilisées (cf. § II.2.2.6). **La perméabilité aux gaz et la perméabilité à l'eau liquide apparaissent donc comme des indicateurs généraux de durabilité** (cf. *Annexe A*).

Chapitre II. Transferts des fluides sous pression dans les bétons.

Sommaire

II.1. Introduction.....	49
II.2. Propriétés de transfert des fluides dans les bétons.....	50
II.2.1. Notions générales sur l'écoulement en milieu poreux.....	50
II.2.1.1. Caractéristique et nature de l'écoulement.....	50
II.2.1.2. Viscosité.....	50
II.2.1.3. Écoulement dans un tube capillaire.....	51
II.2.1.4. Écoulement visqueux.....	52
II.2.1.5. Écoulement par glissement.....	53
II.2.2. Perméabilité du béton.....	54
II.2.2.1. Loi de Darcy.....	54
II.2.2.2. Cas d'un fluide incompressible.....	55
II.2.2.3. Cas d'un fluide compressible.....	56
II.2.2.4. Détermination de la perméabilité intrinsèque du béton.....	59
II.2.2.5. Perméabilité effective.....	61
II.2.2.6. Écart entre la perméabilité à l'eau et la perméabilité au gaz des bétons.....	61
II.2.2.7. Perméabilité relative.....	62
II.3. Paramètres influençant la perméabilité du béton.....	63
II.3.1. Influence du préconditionnement des échantillons sur la perméabilité.....	63
II.3.1.1. Influence de la température de séchage.....	63
II.3.1.2. Influence de la procédure de séchage.....	65
II.3.1.3. Choix de la procédure de séchage.....	66
II.3.2. Influence de la composition de béton sur la perméabilité.....	66
II.3.2.1. Influence des agrégats.....	66
II.3.2.2. Influence du rapport E/C	68
II.3.2.3. Influence de la nature du ciment.....	70
II.3.3. Influence du degré de saturation en eau sur la perméabilité des bétons.....	72
II.3.4. Modèles prédictifs proposées pour le calcul de K_{rl} et K_{rg}	74
II.3.5. Résumé des différentes tailles d'échantillons testés en perméabilité.....	79
II.4. Conclusions.....	81

Chapitre II. Transferts des fluides sous pression dans les bétons.

II.1. Introduction

Ce chapitre répond au premier objectif de ce travail, à savoir faire l'état des connaissances sur les mécanismes de transfert de masse sous gradient de pression (en phase liquide ou gazeuse) dans des bétons sains partiellement saturés. La notion de transfert en milieux poreux fait intervenir nécessairement des paramètres de transfert et des lois susceptibles de décrire au mieux les débits de gaz ou d'eau observés. Il est donc important de décrire ces lois, et d'expliquer leur origine.

Dans la première partie de ce chapitre on présente, un état de l'art relatif aux modes de transfert et les lois qui les régissent. On commence par la mise en revue des différents écoulements qui peuvent se produire sous pression dans un milieu poreux ainsi que les lois qui gouvernent les transferts hydriques (eau et humidité) et le transport du gaz régi par la loi de Darcy dans les matériaux cimentaires. Ensuite, on décrit l'approche de Klinkenberg pour la détermination de la perméabilité intrinsèque dans le cas d'un fluide compressible. A la fin de cette première partie, on présente des notions sur la perméabilité effective et la perméabilité relative, au gaz et à l'eau.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, plusieurs paramètres influençant la perméabilité du béton, principalement l'état hydrique du matériau, sont présentés. On met après en exergue à travers une analyse descriptive, d'une part différents travaux effectués sur la relation entre la perméabilité du béton et son degré de saturation en eau liquide, et d'autre part plusieurs modèles prédictifs, proposés dans la littérature, pour le calcul de la perméabilité relative, au gaz et à l'eau liquide, des milieux poreux partiellement saturés.

II.2. Propriétés de transfert des fluides dans les bétons

II.2.1. Notions générales sur l'écoulement en milieu poreux

La notion de transfert en milieu poreux fait intervenir nécessairement des paramètres de transfert et des lois susceptibles de décrire les flux de gaz ou d'eau observés. Elles sont généralement issues d'équations de comportement connues hors du milieu poreux. Or celui-ci est composé d'espace vide dans lequel ces lois s'appliquent, mais aussi de parois et d'espaces remplis qui influent sur l'expression de ces lois, spécialement lorsque l'on observe le milieu poreux à très grande échelle. Alors, l'étude de l'écoulement en milieu poreux se décompose en deux volets : la description du milieu lui-même (cf. § I-2), et la description liée aux conditions d'écoulement (Nature de l'écoulement et du fluide percolant, viscosité du fluide, compressibilité, etc.).

II.2.1.1. Caractéristique et nature de l'écoulement

La description de la nature de l'écoulement d'un fluide est établie selon l'étude des forces mises en jeu dans le système. Ainsi, la nature de l'écoulement peut être cataloguée suivant différents critères. Par exemple, suivant des considérations physiques, on peut regrouper ces forces en deux grandes catégories : les forces de viscosité et les forces d'inertie [LAGH 06]. Lorsque les forces de viscosité sont nettement prédominantes par rapport aux forces d'inertie, l'écoulement est dit laminaire, ou visqueux. Cet écoulement se caractérise par le mouvement d'une masse fluide constituée de filets juxtaposés, parfaitement individualisés [BILL 03]. Donc un écoulement est dit laminaire lorsqu'il est régulier et s'effectue par glissement des couches de fluide les unes sur les autres sans échange de particules entre elles (ne présente pas trop de variations spatiales ou temporelles), bien souvent stationnaire (cf. Fig. II-1). La résistance de la masse du fluide à l'écoulement est alors uniquement due à sa viscosité. Par ailleurs, lorsque la vitesse de l'écoulement augmente, on observe une vitesse critique à partir de laquelle se forment spontanément, et de façon aléatoire, de petits tourbillons dans la masse du fluide. Dans ce cas, les forces d'inertie sont prépondérantes, ce qui augmente la résistance à l'écoulement, lequel devient turbulent.

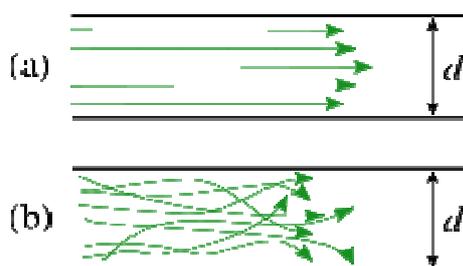


Fig. II-1. (a) écoulement laminaire, (b) : écoulement turbulent.

Ces notions de régime laminaire ou turbulent sont liées à la "viscosité" du fluide. Dans une conduite ou autour d'un obstacle, au voisinage d'une paroi sur laquelle la vitesse relative du fluide est nulle, apparaissent de fortes variations de vitesse qui impliquent donc la viscosité.

II.2.1.2. Viscosité

C'est la résistance d'un fluide à son écoulement uniforme et sans turbulence. En fonction de la viscosité du fluide, la répartition de la vitesse du fluide n'est pas la même sur toute la

surface (cf. **Fig. II-2**). La viscosité est la propriété fondamentale d'un fluide au travers duquel se produisent des forces d'interaction opposées à la déformation du fluide pendant l'écoulement [PICA 01a]. Dans l'hypothèse d'un écoulement plan (selon l'axe Ox et dans un plan perpendiculaire à l'axe Oy), la viscosité dynamique μ est déterminée à partir des forces de friction définies selon la loi de Newton :

$$\tau_{xy} = \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad (\text{II} - 1)$$

où τ_{xy} est l'effort tangentiel (force de friction) entre deux couches du fluide, glissant l'une sur l'autre. La viscosité est donc le coefficient de proportionnalité entre le gradient de vitesse et l'effort tangentiel τ_{xy} s'opposant au mouvement relatif de fluide.

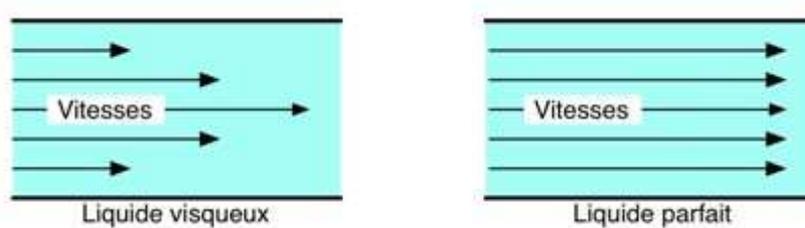


Fig. II-2. Influence de la viscosité sur la vitesse du fluide.

La viscosité pour un liquide est déterminée à partir des forces d'attraction entre les molécules de ce liquide. Ces forces sont négligeables pour un gaz, c'est le phénomène d'échange de quantité de mouvement entre les molécules qui détermine sa viscosité [LAGH 06]. Ce phénomène peut être influencé par la température, la pression et aussi par la taille des pores percolés par le fluide utilisé. La viscosité dynamique des gaz augmente en fonction de la température contrairement à celles des liquides qui diminue quand la température augmente. En revanche, la viscosité dynamique des gaz n'est pas fonction de la pression [PICA 01a]. Il est intéressant de noter que la viscosité dynamique de l'eau est supérieure à celle de l'air, mais l'eau et l'air sont considérés comme étant des fluides de très faible viscosité [PERR 92].

II.2.1.3. Écoulement dans un tube capillaire

En première approche, les hypothèses liées à un écoulement dans un tube capillaire cylindrique rectiligne sont rappelées. Ce tube peut être considéré comme l'entité d'un chemin de percolation du réseau poreux : un pore de rayon moyen r_0 .

Pour un écoulement unidirectionnel selon l'axe (Ox) d'un tube capillaire de rayon r , l'équation de Navier-Stokes dans un repère en coordonnées cylindriques d'axe Ox s'écrit :

$$\rho \frac{\partial v_x(r)}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v_x(r)}{\partial r} \right) \right] \quad (\text{II} - 2)$$

Où ρ est la masse volumique du fluide, P la pression du fluide à l'abscisse x et $v_x(r)$ la vitesse locale du fluide qui égale à sa composante selon x . Pour un écoulement laminaire, le terme de gauche dans l'Eq. (II-2) est nul.

Pour un tube circulaire droit d'axe Ox et de rayon r_0 , la résolution de l'Eq. (II-2), mène à la relation bien connue de Hagen-Poiseuille qui ont exprimé, les premiers au XIX^{ème} siècle, les fondements de l'écoulement d'un fluide à travers un capillaire et qui ont ainsi montré que le débit était proportionnel au gradient de pression ; mais également inversement proportionnel à la viscosité du fluide:

$$v_{vx} = \frac{r_0^2}{8\mu} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (\text{II} - 3)$$

Où v_{vx} est la vitesse moyenne d'écoulement visqueux du fluide traversant la section droite du tube à l'abscisse x .

Dans le cas d'un gaz, la vitesse de l'écoulement augmente lorsque le gaz se détend. Donc, la vitesse de l'écoulement est variable selon la longueur du tube. Alors, seul le flux massique ($\rho \cdot v_{vx}$) reste constant le long du tube.

II.2.1.4. Écoulement visqueux

L'écoulement visqueux se produit sous l'effet d'un gradient de pression total du fluide et produit un mouvement d'ensemble sans distinction des éventuelles différences apportées par les composants moléculaires [PICA 01a]. On suppose généralement qu'un fluide visqueux adhère à la paroi. La vitesse de contact est donc nulle (condition de non-glissement) (cf. Fig. II-3). On suppose que le gradient de pression est orienté selon l'axe Ox. Pour un tube circulaire de rayon constant r_0 , la vitesse est parallèle à l'axe du tube Ox, l'équation du profil de vitesse de l'écoulement d'un liquide dans un capillaire de rayon r_0 s'écrit :

$$v_{vx}(r, x) = v_{vx}(r) = v_{max} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (\text{II} - 4)$$

Avec ;

$$v_{max} = -\frac{dp}{dx} \frac{r_0^2}{4\mu} \quad (\text{II} - 5)$$

Par conséquent, la vitesse $v_{vx}(r)$ s'écrit :

$$v_{vx}(r) = -\frac{dp}{dx} \frac{1}{4\mu} (r_0^2 - r^2) \quad (\text{II} - 6)$$

Par ailleurs, la pression ne varie pas dans l'épaisseur de l'écoulement. Ces conditions, donnant lieu à l'écoulement de Poiseuille, impliquent que l'écoulement s'organise selon un champ de vitesse parabolique (cf. Fig. II-3) avec une vitesse nulle aux parois et maximale au centre.

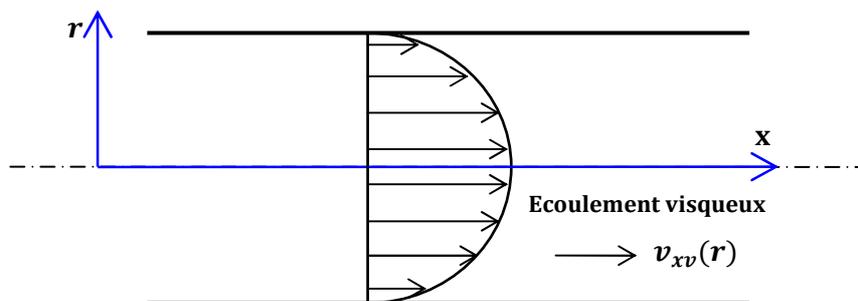


Fig. II-3. Profil des vitesses d'un fluide visqueux dans un tube capillaire.

II.2.1.5. Écoulement par glissement

Ce type d'écoulement par glissement (slip flow) est spécifique aux gaz ; il est indépendant de la viscosité du fluide [KLIN 41], [CARM 56] et sa contribution est d'autant plus significative que la perméabilité du milieu est faible [THÉN 66]. Cependant, quand un gaz percole un réseau poreux fin comme celui du béton, en plus d'un écoulement visqueux, un écoulement par glissement, lié au phénomène de non-adhérence du gaz au contact de la paroi des capillaires, peut apparaître. Cet effet provient de la collision des molécules de gaz avec les parois du pore (écoulement de Knudsen (cf. Fig. I-14a et § I.3.2.3b), qui contrairement à la viscosité, résulte de la collision des molécules de gaz entre elles. Le phénomène de collision a comme effet, que la vitesse de contact à la paroi est non-nulle : on l'appelle vitesse de glissement (cf. Fig. II-4). Cet écoulement de glissement (appelé effet Klinkenberg [KLIN 41]) se produit lorsque le diamètre moyen des capillaires traversés par le flux gazeux est de l'ordre de grandeur du libre parcours moyen des molécules du gaz λ (distance moyenne entre les collisions de molécules (cf. Eq. (II-7)).

Le libre parcours moyen des molécules de gaz correspond à la distance parcourue par une particule entre deux chocs successifs ; cette distance dépend de la pression et de la température :

$$\lambda = \frac{kT}{P\pi\sqrt{2}D^2} \quad (\text{II} - 7)$$

Avec k : constante de Boltzmann ($1,38066.10^{-23}$ J/K),

D : diamètre des molécules, dont $\sqrt{2}\pi D^2$ est la section efficace de choc ($0,43 \text{ nm}^2$ pour l'oxygène et l'azote),

T : température (K).

En effet, la contribution de l'écoulement par glissement dans l'écoulement total du gaz devient négligeable (écoulement visqueux) lorsque le diamètre des capillaires est très supérieur au libre parcours moyen des molécules de gaz λ . Mais quelque soit le rayon du tube r_0 , à l'interface entre le gaz et le capillaire, la vitesse de glissement du fluide aux parois du capillaire v_s n'est pas nulle. La vitesse d'un écoulement par glissement augmente lorsque le libre parcours moyen des molécules du gaz λ augmente, donc quand la pression du fluide diminue [PICA 01a].

Si v_s est la vitesse de glissement du fluide aux parois du capillaire, en coordonnées cylindriques d'axe Ox (l'axe du tube), la vitesse du gaz sur une section droite est fonction de sa coordonnée radiale r , et est égale à sa composante axiale $v_{gx}(r)$ telle que :

$$v_{gx}(r) = -\frac{dP}{dx} \left[\frac{1}{4\mu} (r_0^2 - r^2) + v_s \right] = v_{vx}(r) + v_s \quad (\text{II} - 8)$$

La vitesse locale du gaz dans un capillaire peut donc être considérée comme la somme de la vitesse locale d'écoulement due à la viscosité $v_{vx}(r)$ et la vitesse locale d'écoulement due au glissement v_s (cf. Eq. (II-8)).

Pour des conditions de température et de pression données, la vitesse de l'écoulement par glissement v_s dépend de la variable géométrique r_0 et la vitesse de l'écoulement visqueux $v_{vx}(r)$ dépend de la variable géométrique r_0 élevée au carré (cf. Eq. (II-8)). Les effets de l'écoulement par glissement sont donc plus sensibles sur l'écoulement global lorsque le

rayon du tube capillaire est faible. La contribution de l'écoulement par glissement est d'autant plus significative que la perméabilité du milieu est faible [KLIN 41], [THÉN 66].

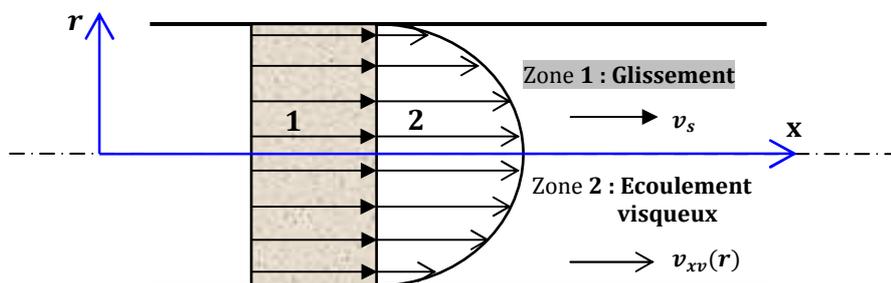


Fig. II-4. Profil des vitesses d'un gaz dans un capillaire sous l'effet d'un gradient de pression.

II.2.2. Perméabilité du béton

La perméabilité d'un milieu poreux est définie comme sa capacité à se laisser traverser par un fluide sous gradient de pression totale. Dans le cas des matériaux cimentaires, trois fluides sont susceptibles de pénétrer dans la matrice poreuse cimentaire et de mettre en cause sa durabilité. Ce sont : l'eau pure ou contenant des ions, le gaz carbonique et l'oxygène. Ils peuvent se déplacer au travers du matériau de différentes façons ; mais tous les mouvements dépendent principalement de la structure de la pâte de ciment hydratée [HAMA 09]. La perméabilité du béton est fortement influencée par des paramètres du milieu poreux comme la porosité, la tortuosité et la connectivité [TRAN 09]. Selon Scrivener (2001) [SCRI 01], plus la porosité augmente ou est connectée, plus la résistance aux flux est faible, plus la tortuosité devient rectiligne est plus la perméabilité est grande. Outre sa structure, la saturation du réseau poreux, et donc les transferts hydriques associés, conditionnent l'évolution des propriétés de transfert d'un matériau pour les phases gazeuses et les phases aqueuses [BRUE 09].

Rappelons que l'on trouve différentes méthodes de mesure de la perméabilité en laboratoire du fait qu'il n'existe pas à l'heure actuelle d'essai normalisé pour sa détermination. Ainsi, chaque laboratoire a développé son propre perméamètre et sa propre procédure de mesure dépendant du fluide (Gaz ou liquide), de sa pression d'injection, du régime d'écoulement, de la taille des éprouvettes et de l'état de celles-ci [BAMF 87], [ALDE 99], [HEAR 99]. Ceci rend la comparaison des résultats de la littérature très difficile. Néanmoins, vers une standardisation de la mesure de la perméabilité au gaz, la tendance s'est orientée vers la méthode du Cembureau [KOLL 89].

Pour l'évaluation de la perméabilité des matériaux cimentaires, la difficulté repose sur le respect des hypothèses de la loi de Darcy (cf. § II.2.2.1), en particulier les interactions existantes entre le matériau et le fluide d'injection servant à la mesure. Ainsi, en fonction du fluide utilisé, les interprétations doivent prendre en compte différents phénomènes. On distingue la mesure de perméabilité au gaz et au liquide.

II.2.2.1. Loi de Darcy

Depuis longtemps, l'étude de l'écoulement d'un fluide à travers un milieu poreux a fait l'objet de nombreuses recherches. Hagen en 1839 et Poiseuille en 1840 ont observé que le

débit d'un fluide à travers un capillaire est proportionnel au gradient de pression et inversement proportionnel à la viscosité du fluide. Darcy (1856) a appliqué la loi de Hagen-poiseuille au cas des milieux poreux de nature granulaire et il a défini le concept de la conductivité hydraulique appelé aussi « coefficient de perméabilité » d'un milieu. Selon Darcy, ce coefficient est la propriété intrinsèque du milieu quelle que soit la nature du fluide percolant (gaz ou liquide).

Cette loi d'écoulement des fluides dans un milieu poreux proposée par Darcy (1856) est basée sur les hypothèses suivantes :

- Les forces d'écoulement dues à la viscosité prédominent sur les forces d'inertie ;
- Il n'y a aucune interaction physique ou chimique entre le fluide d'infiltration et le milieu poreux, (ce qui est loin d'être le cas des matériaux à matrice cimentaire lorsque le fluide injecté est l'eau) ;
- Les écoulements du fluide sont supposés laminaires ;
- Le milieu poreux est saturé avec le fluide percolant (dans le cas contraire, on évoque le terme de la perméabilité relative) [DANA 99] (cf. § II.2.2.7).

Dans les milieux poreux isotropes, l'écoulement du fluide est régi par la loi de Darcy qui s'écrit sous sa forme simple :

$$\vec{v} = -K \vec{i} \quad (\text{II} - 9)$$

Où \vec{v} est la vitesse de filtration en (m/s), \vec{i} le gradient hydraulique et K le coefficient de perméabilité de Darcy (ou conductivité hydraulique) en (m/s).

Le coefficient de perméabilité de Darcy (K) caractérise à la fois l'aptitude du milieu filtrant à se laisser traversé par un fluide et l'aptitude du fluide à percoler. Il est donc fonction, pour un matériau donné, à la fois du fluide et du milieu poreux considérés. Alors, la loi de Darcy peut s'exprimer sous la forme plus générale suivante :

$$\vec{v} = -\frac{K}{\mu} (g \vec{r} \vec{a} d P + \rho g \vec{r} \vec{a} d z) \quad (\text{II} - 10)$$

Où ρ est la masse volumique du fluide en (kg/m³), g est l'accélération de la pesanteur en (m/s), μ est la viscosité dynamique du fluide en (Pa.s), P est la pression d'injection (différence entre la pression appliquée à l'entrée ($x = 0$) et à la sortie de l'échantillon ($x = L$)) en (Pa), z est l'altitude par rapport au niveau de référence et enfin K est la perméabilité intrinsèque en (m²) qui est indépendante du fluide et ne dépend que du réseau poreux (cf. Eq. (II-12)).

II.2.2.2. Cas d'un fluide incompressible

Les liquides sont généralement considérés comme non compressibles comme le cas de l'eau qui est un fluide purement visqueux (cf. Fig. II-3), substance déformable sans forme propre (qui change de forme sous l'action d'une force externe qui lui est appliquée). Sa forme est conservée seulement si un corps solide les limite. Généralement les liquides présentent une surface propre : ils conservent le même volume quelque soit leur forme.

Darcy a observé que la vitesse d'écoulement d'un fluide incompressible à travers un milieu poreux granulaire est proportionnelle au gradient hydraulique, lequel coefficient de proportionnalité est appelé « coefficient de perméabilité K_l » ou conductivité hydraulique du fluide en (m/s).

La réalisation des essais de perméabilité à des pressions d'injection relativement élevées permet de simplifier l'Eq. (II-10) en négligeant l'effet de la pesanteur. Alors la loi de Darcy simplifiée s'écrit :

$$\vec{v} = -\frac{K}{\mu} g \vec{r} \text{ad} P \quad (\text{II} - 11)$$

Dans le cas d'une percolation d'un fluide incompressible purement visqueux à travers un milieu poreux saturé par ce fluide, la loi de Darcy donnée par l'Eq. (II-11) peut être directement appliquée pour l'estimation de la perméabilité intrinsèque du milieu. Par ailleurs, dans le cas de la perméabilité à l'eau, nous parlons souvent de la conductivité hydraulique K_l (m/s), qui dépend de la viscosité dynamique du fluide μ en (Pa.s), au lieu de la perméabilité intrinsèque K (m²), définie par :

$$K = \frac{\mu \cdot K_l}{\rho \cdot g} \quad (\text{II} - 12)$$

Dans le cas de l'eau dont la viscosité dynamique μ est de l'ordre de 10⁻³ Pa.s à 20° C, le rapport $\mu/\rho g$ vaut 1,05.10⁻⁷ m/s ; la valeur de 1.10⁻⁷ est généralement admise en pratique. Donc, la perméabilité K de 1 m² correspond à une conductivité hydraulique K_l de l'ordre de 10⁻⁷ m/s.

À partir de l'Eq. (II-11), si on applique un gradient de pression d'eau (fluide incompressible) sur un milieu poreux, complètement saturé par l'eau, sous forme d'une charge hydraulique ΔH en (m) appliquée au fluide ($\Delta H = H_2 - H_1$, où H_1 et H_2 étant les hauteurs d'eau en (m) appliquées à l'entrée et à la sortie respectivement), l'eau s'écoule par les pores connectés. On suppose que la vitesse moyenne d'écoulement ($v = Q/S$) (le débit total sur la section) est proportionnelle au gradient de pression $\Delta H/L$ [DARC 56]. Donc, la relation de Darcy s'écrit alors communément en fonction de la charge hydraulique ΔH , de la section S et de l'épaisseur L en (m) du matériau ainsi que de débit volumique Q en (m³/s) à la sortie du matériau (cf. Eq. (II-13)).

$$\frac{Q}{S} = -K_l \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (\text{II} - 13)$$

Où K_l est la conductivité hydraulique à saturation ou "coefficient de perméabilité" à l'eau du matériau à l'état saturé en (m/s). Lorsque la teneur en eau du matériau est inférieur à la teneur de saturation, la conductivité hydraulique (ou perméabilité relative) notée $K_l(S_l)$ est inférieure à K_l et dépend de S_l .

Cette loi s'emploie aussi pour la description de l'écoulement du gaz dans un milieu poreux [DANA 99], [LION 04]. Mais cette équation initiale de Darcy est exprimée par la pression hydraulique qui ne convient pas au cas du gaz. Donc une autre forme plus générale de la loi de Darcy, qu'on utilise pour la détermination de la perméabilité au gaz dans cette thèse, est exprimée par la pression P et la perméabilité intrinsèque K_{int} (cf. § II.2.2.4).

II.2.2.3. Cas d'un fluide compressible

Dans le cas de l'écoulement d'un fluide compressible (cas d'un gaz), la loi de Darcy ne peut être directement appliquée à cause de la compressibilité du gaz ainsi que du caractère de son écoulement qui n'est pas purement visqueux [HAMA 09]. En réalité, le débit global de gaz traversant l'échantillon est dû aux écoulements visqueux et par glissement (cf. Fig. II-4).

La perméabilité apparente K_{app} n'est alors pas la valeur de la perméabilité intrinsèque recherchée, puisqu'elle est dépendante de la pression moyenne du gaz dans l'échantillon. K_{app} constitue donc une valeur approchée par excès de la perméabilité intrinsèque K_{int} [LAGH 06].

La vitesse d'écoulement et le débit volumique varient en tout point avec la pression dans le cas de l'écoulement d'un gaz, même en régime permanent. Par contre le débit massique reste constant en tout point [PICA 01a], [CHOI 06]. Les conditions aux limites imposées à un échantillon (disque de béton) sont alors décrites dans la Fig. II-5. S'il s'agit d'une infiltration d'un fluide compressible, il faut donc modifier la loi de Darcy et s'adapter à la géométrie.

Si le matériau est supposé homogène selon l'axe d'écoulement "y" et lorsque les pressions à l'intérieur de celui-ci sont à l'équilibre (en régime permanent), le gradient de pression est supposé constant dans le volume de l'échantillon et la pression du gaz dans le matériau ne dépend que de la variable spatiale "y".

Pour un écoulement unidirectionnel du gaz (fluide compressible) en régime laminaire, la loi de Darcy, basée sur la loi d'écoulement de poiseuille s'écrit :

$$Q = -K_{app} \frac{S}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (\text{II} - 14)$$

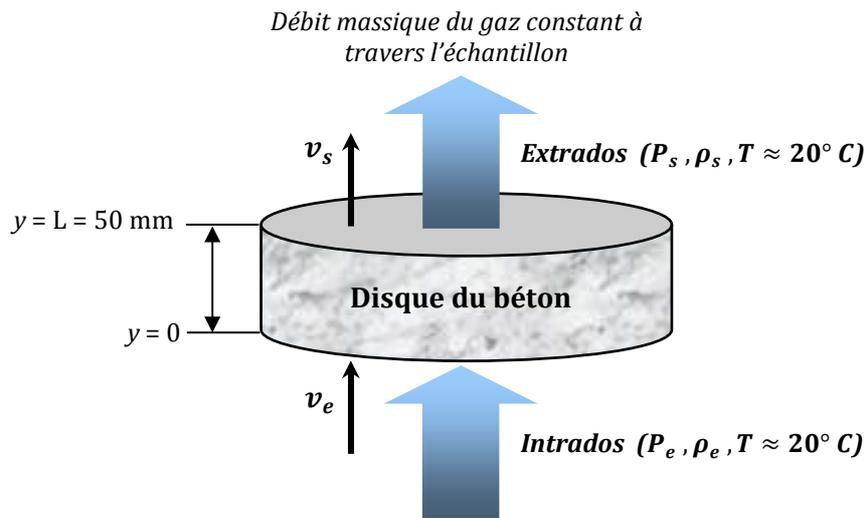


Fig. II-5. Grandeurs associées à l'infiltration d'un gaz à travers un disque de béton lors d'un essai de perméabilité.

La loi de Darcy modifiée se formule à l'aide du principe de conservation de la masse :

$$\rho \cdot v = cste \quad (\text{II} - 15)$$

Où ρ est la masse volumique du gaz (kg/m^3) et v est la vitesse de l'écoulement unidirectionnel (m/s).

Nous appliquons cette loi en amont (à l'intrados noté "e") et en aval (à l'extrados noté "s"):

$$\rho_e \cdot v_e = \rho_s \cdot v_s = \rho \cdot v \quad (\text{II} - 16)$$

Or $v = Q/S$, ainsi en injectant Q dans l'**Eq. (II-11)** sous forme différentielle

$$\rho \cdot v = -\rho \cdot \frac{K_{app}}{\mu} \frac{dP}{dy} \quad (\text{II} - 17)$$

À de faibles pressions (< 1 MPa), les gaz employés peuvent être considérés comme parfaits pour lesquels la masse volumique ρ dans des conditions isothermes est donc proportionnelle à la pression P :

$$\rho = P \frac{M}{R \cdot T} \quad (\text{II} - 18)$$

Avec M est la masse molaire du gaz, R est la constante du gaz parfait et T est la température en Kelvin.

Dans le cas d'un écoulement isotherme, et pour de faibles variations de pression, la viscosité μ peut être considéré comme indépendante de la pression P . On peut donc écrire à partir de l'**Eq. (II-16)** :

$$P \cdot v = -P \cdot \frac{K_{app}}{\mu} \frac{dP}{dy} = -\frac{K_{app}}{\mu} \frac{1}{2} \frac{dP^2}{dy} \quad (\text{II} - 19)$$

D'après les **Eqs. (II-16)** et **(II-17)**, Le terme $(P \cdot v)$ de l'**Eq. (II-19)** demeure constant sur toute la longueur de l'échantillon considéré. En intégrant l'expression précédente (**Eq. (II-19)**), sur la longueur de l'échantillon traversé par le fluide selon y (entre $(y = 0)$ et $(y = L)$) (cf. **Fig. II-5**), on obtient :

$$P \cdot v \cdot L = -\frac{K_{app}}{2\mu} (P_s^2 - P_e^2) \quad (\text{II} - 20)$$

On considère que les mesures de débits soient effectuées en aval (extrados) à la pression P_s , donc l'**Eq. (II-20)**, donne :

$$v_s = \frac{K_{app}}{2\mu \cdot L \cdot P_s} (P_e^2 - P_s^2) \quad (\text{II} - 21)$$

Si l'on pose : P_m la pression moyenne de l'écoulement de fluide (Pa), avec $P_m = (P_e + P_s)/2$, et ΔP le gradient de pression (différence ou la chute de pression (Pa)), avec $\Delta P = P_e - P_s$, l'**Eq. (II-21)** peut aussi s'écrire :

$$v_s = \frac{K_{app}}{\mu \cdot L \cdot P_s} P_m \cdot \Delta P \quad (\text{II} - 22)$$

L'expression de la perméabilité apparente peut donc être obtenue en appliquant directement la relation suivante :

$$K_{app} = \frac{2\mu \cdot L \cdot Q_s}{S} \frac{P_s}{(P_e^2 - P_s^2)} \quad (\text{II} - 23)$$

S : Section droite de l'échantillon (m²) (pour un disque plein on a : $S = (\pi \cdot d^2)/4$),

L : Longueur de l'échantillon (m),

Q_s : Débit volumique mesuré à l'extrados (de sortie) de la cellule de l'essai où règne la pression P_s (m³.s⁻¹).

La perméabilité apparente K_{app} ainsi définie est une fonction linéaire de la pression moyenne P_m du gaz dans le matériau testé. Elle diminue lorsque la pression moyenne P_m augmente (cf. **Fig. II-6**).

II.2.2.4. Détermination de la perméabilité intrinsèque du béton

▪ Cas d'un écoulement laminaire

La loi de Darcy ne prend en compte que la viscosité dynamique et le gradient de pression du fluide de percolation, c'est-à-dire que la viscosité du fluide gouverne l'écoulement. Pour un écoulement visqueux, les vitesses sont nulles aux parois du tube capillaire (cf. Fig. II-4). Ceci est une condition nécessaire pour l'application de la loi de Darcy.

Cette condition est satisfaite lorsque le fluide de percolation est un liquide. Lorsque le fluide injecté est un gaz compressible, un écoulement de glissement peut s'ajouter à l'écoulement visqueux (cf. § II.2.1.5). La perméabilité intrinsèque, qui ne dépend que de la structure poreuse du matériau, peut uniquement être déterminée à partir des écoulements visqueux du fluide qui ont lieu dans l'échantillon lors de la percolation du gaz [LAGH 06]. Donc il est nécessaire d'identifier la proportion des écoulements visqueux dans l'écoulement total. Différentes approches expérimentales sont disponibles pour retrouver la perméabilité intrinsèque telles que l'approche de Klinkenberg [KLIN 41], de Carmen [CARM 56] ou encore l'approche qui consiste à déterminer la perméabilité intrinsèque à partir de mesures aux forts débits gazeux [PERR 92], [ABBA 99]. Cependant, l'approche la plus utilisée est celle de Klinkenberg, du fait de sa simplicité et de sa validité par plusieurs chercheurs [VILL 01], [PICA 01b], [LION 04] et [CHEN 09].

Le phénomène de glissement (appelé effet Klinkenberg) s'accompagne d'une augmentation de la perméabilité. Cette augmentation est également observable lorsque la pression moyenne d'injection du gaz d'essai est faible. Car en basse pressions, l'écoulement est affecté par la présence des chocs des molécules du fluide avec les parois. En effet, plus la pression moyenne est faible, plus le libre parcours moyen augmente, c'est-à-dire qu'il faut élever la pression du gaz afin de diminuer les phénomènes de glissement [KLIN 41]. Si la pression du gaz tendait vers l'infini, l'écoulement par glissement serait entièrement éliminé.

L'application de l'approche de Klinkenberg (1941) [KLIN 41] permet d'extraire une perméabilité relative uniquement aux écoulements visqueux et non aux écoulements par glissement, à partir de plusieurs mesures de la perméabilité apparente à différentes pressions différentielles ΔP (cf. Fig. II-6), et ainsi de trouver une perméabilité intrinsèque appelée K_{int} par la suite. Nous pouvons observer que les écarts entre la perméabilité intrinsèque et la perméabilité apparente sont de plus en plus faibles lorsque la pression augmente.

Klinkenberg qui a introduit le premier, la notion de perméabilité intrinsèque. Il a élaboré une relation générale (Eq. (II-24)) qui permet de dissocier la valeur du coefficient de perméabilité intrinsèque (absolue) du milieu, soit :

$$K_{app} = K_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_m} \right) \quad (\text{II} - 24)$$

Où K_{app} est la perméabilité apparente mesurée au gaz (m^2), K_{int} est la perméabilité intrinsèque (m^2) et est indépendante de la pression moyenne P_m (moyenne arithmétique de la pression d'entrée et de sortie), β est la constante de Klinkenberg qui est fonction de la finesse du réseau poreux et du gaz infiltrant (Pa).

La perméabilité intrinsèque K_{int} est la valeur limite de la perméabilité apparente lorsque la pression moyenne du fluide tend vers l'infini, c'est-à-dire lorsque le gaz tend vers une phase condensée (liquide) [PICA 01a], [ROZI 07], [BARO 07c]. Le principe de la détermination de K_{int} , selon l'approche de Klinkenberg, est représenté sur la Fig. II-6.

La valeur de K_{int} est déterminée selon cette approche par l'intersection entre l'axe des ordonnées (axe des valeurs de K_{app}) et la régression linéaire (droite avec une bonne précision) des différentes mesures de perméabilité apparente effectuées pour des différentes pressions d'injection selon l'inverse de la pression moyenne.

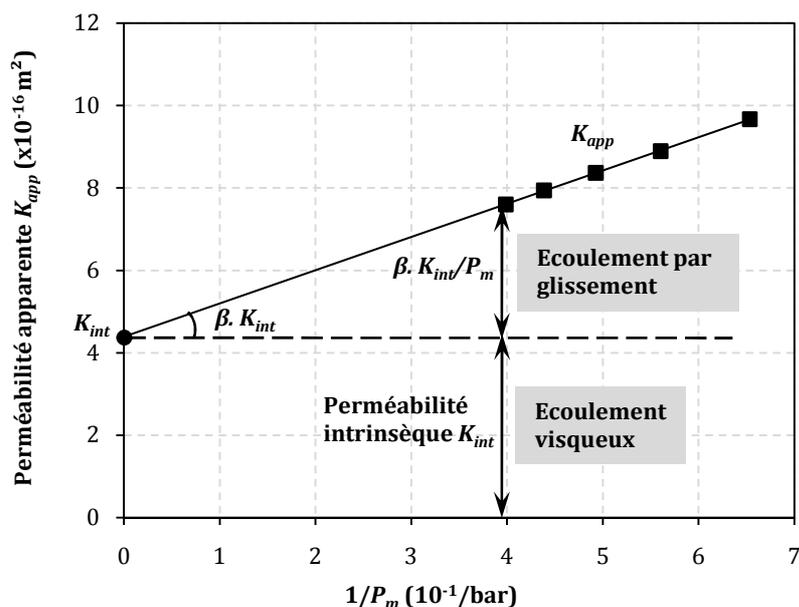


Fig. II-6. Méthode de Klinkenberg et son interprétation sur une série de résultats obtenus avec un béton ordinaire.

D'après l'Eq. (II-24) le débit des écoulements visqueux Q_{visq} est proportionnel à K_{int} , tandis que le débit des écoulements par glissement Q_{gliss} est proportionnel au terme $\beta \cdot K_{int} / P_m$ (cf. Fig. II-6). Pour une pression différentielle définie, l'Eq. (II-25) donne le rapport de ces débits :

$$\frac{Q_{gliss}}{Q_{visq}} = \frac{\beta}{P_m} \quad (\text{II} - 25)$$

Lorsque la pression moyenne P_m est égale à la constante de Klinkenberg β , le débit dû aux écoulements visqueux équivaut au débit dû aux écoulements par glissement. Par ailleurs, si le rayon des pores traversés par le flux de gaz augmente, la part des écoulements par glissement décroît et le rapport donné par l'Eq. (II-25) proportionnel à la constante β diminue.

La valeur de β est donc significative de la finesse du réseau poreux percolé par le gaz lors de son écoulement [ABBA 98]. Elle est intrinsèque au matériau, pour un état de saturation donné. Ceci indique que la perméabilité intrinsèque K_{int} est liée au seul écoulement visqueux. Sa valeur dépend aussi du degré de saturation du matériau lors des essais, on l'appelle alors perméabilité effective K_{eff} .

II.2.2.5. Perméabilité effective

Au sens de Darcy, la perméabilité est mesurée sur des matériaux saturés en eau ; or la réalité montre que le matériau béton peut être soumis à des fluctuations de son taux d'humidité en fonction du temps en relation avec son milieu environnant. Le béton est donc souvent partiellement saturé en eau : des pores sont occupés par l'eau et d'autres sont occupés par l'air.

Lorsqu'un gradient de pression du gaz est appliqué sur un matériau partiellement saturé en eau, le gaz s'écoule par les pores remplis par l'air. Cela donne une perméabilité plus faible que la perméabilité saturée au gaz, car des passages de gaz sont empêchés par les pores remplis d'eau. La quantité d'eau présente dans le réseau poreux peut causer des effets « bouchons » qui gênent le passage des molécules de gaz [CHEN 11]. Cette perméabilité est appelée perméabilité effective au gaz $K_{g,eff}$. Elle diminue lorsque la saturation en eau augmente.

Lorsqu'on applique un gradient de pression d'eau sur un matériau partiellement saturé en eau, l'eau s'écoule par les pores déjà remplis par l'eau. La perméabilité effective à l'eau $K_{l,eff}$ (mesurée à x degré de saturation) serait donnée justement par le débit à travers les pores remplis d'eau. Cela donne une perméabilité plus faible que la perméabilité mesurée à l'état complètement saturé en eau. $K_{l,eff}$ augmente avec le degré de saturation du matériau.

II.2.2.6. Écart entre la perméabilité à l'eau et la perméabilité au gaz des bétons

Théoriquement lorsqu'on considère l'écoulement monophasique dans un milieu poreux, la perméabilité intrinsèque doit être indépendante de la nature de fluide. Donc, la perméabilité intrinsèque au gaz notée K_{int} et la perméabilité intrinsèque à l'eau notée K_l devraient être identiques, mais lorsqu'on fait des mesures expérimentales de perméabilité sur des bétons, on peut obtenir des mesures de perméabilité intrinsèque qui divergent fortement lorsque l'essai est effectué avec le gaz ou avec l'eau. Les résultats expérimentaux indiquent que les perméabilités intrinsèques aux gaz des bétons courants (de résistance caractéristique en compression à 28 jours d'environ 30 MPa) sont souvent au moins 10 fois (un ordre de grandeur) plus grandes que leurs perméabilités intrinsèques à l'eau [TSIV 05], [DAVY 07], [TANI 09], [BUIL 92]. Si on change l'eau par le liquide éthanol, par exemple, on peut retrouver des perméabilités de même ordre de grandeur entre la perméabilité au gaz et à l'éthanol [LOOS 02].

Les hypothèses qui peuvent expliquer une telle différence des résultats entre les mesures avec le gaz ou avec l'eau sont présentées dans ce qui suit. La principale explication de cette différence, réside dans la généralisation de la loi de Darcy aux bétons.

➤ **Surévaluation de la perméabilité au gaz**

Le transport de l'eau liquide est essentiellement visqueux, alors que l'écoulement de gaz à l'échelle des pores comporte deux composantes : une visqueuse et une de glissement (effet Klinkenberg) (cf. Fig. II-6). Cet écoulement par glissement a pour effet d'augmenter la perméabilité apparente au gaz des bétons. Il peut être pris en compte dans la loi de Darcy pour garder une même perméabilité intrinsèque pour le liquide et le gaz. Néanmoins, il est rapporté dans la littérature [MAIN 99], [BARO 07b], [THIE 07] que, même si l'effet de glissement est pris en compte, des écarts existent toujours entre les valeurs de perméabilité intrinsèque mesurées pour les liquides et pour les gaz. En effet, les réseaux poreux

impliqués dans le transport sont différents si le gaz ou l'eau migre dans le matériau. Par conséquent, une notion de perméabilité intrinsèque unique ne peut donc pas être appliquée dans le cas des matériaux cimentaires. Il convient ce faisant de distinguer les perméabilités intrinsèques à l'eau liquide K_l et au gaz K_{int} [BARO 07b].

Par ailleurs, pour pouvoir mesurer la perméabilité au gaz du béton, il est nécessaire de faire subir aux échantillons testés un séchage préalable. Alors, le préconditionnement est l'une des raisons les plus importantes qui expliquent la différence de mesure de perméabilité intrinsèque au gaz et au liquide, D'ailleurs le séchage peut faire varier la perméabilité au gaz des bétons de plusieurs ordres de grandeur : il est donc très important de savoir quel séchage il convient d'appliquer, pour évacuer uniquement l'eau libre des échantillons. La difficulté réside dans le fait qu'il faut établir quel est le séchage qui modifie ou dégrade au minimum la structure poreuse du matériau.

➤ ***Sous évaluation de la perméabilité à l'eau***

Pratiquement la perméabilité à l'eau semble, dans bien des cas, plus représentative du matériau en service, vu que la plupart des problèmes d'étanchéité dans le génie civil sont en rapport avec l'eau. Cependant pour des problèmes d'infiltration sous forme liquide, la perméabilité à l'eau du béton est délicate à mesurer car il faut souvent du temps pour que les pores soient saturés. Il se révèle particulièrement difficile, pour des bétons sains de faible perméabilité, tel que des BHP, de mesurer avec précision les débits d'eau très faibles qui traverse l'échantillon [BUIL 92], [EL-DI 95]. Cette difficulté de mesure de débit très faible est une des principales raisons qui peuvent conduire à une sous évaluation de la perméabilité du béton testé.

Par ailleurs, le principal inconvénient de la perméabilité à l'eau réside dans le fait que, étant donné les caractéristiques et la composition de la microstructure des bétons, l'eau n'est pas totalement inerte vis-à-vis de la pâte du ciment [ALAR 03]. La plus grande partie des milieux fluides présente un caractère acide, vis-à-vis du béton où les composés hydratés de la pâte de ciment forment ainsi un milieu basique prononcé [DUVA 92]. Il existe donc des interactions entre l'eau et le matériau cimentaire. Ces interactions se traduisent par un phénomène de dissolution de la portlandite et de précipitation du carbonate de calcium qui obture des pores [BEMF 87], [HOOT 89], [DUVA 92], [HEAR 98], [PICA 01a]. D'autres phénomènes tels que le gonflement des hydrates CSH, la continuation de l'hydratation et l'obturation des pores par des particules en suspension, participent aussi à la réduction de la porosité [HEAR 94] et produisent donc un véritable changement de la géométrie de la microstructure du milieu poreux et donc, forcément, ont une conséquence sur la mesure de la perméabilité intrinsèque qui tend à diminuer dans le temps. La réactivité du fluide conduit alors à une sous évaluation de la perméabilité du béton. Pour limiter cette influence il convient de considérer la perméabilité au tout début de l'essai; cependant, le fait que la saturation de l'échantillon soit alors très souvent incomplète, constitue un autre facteur de sous évaluation de la perméabilité [HEAR 99].

II.2.2.7. Perméabilité relative

C'est une mesure classique qui permet d'accéder à un ensemble de valeurs utiles pour l'étude des transferts de fluide [YAYI 05]. Elle permet de prendre en compte, pour les milieux non saturés, le fait que les pores sont partiellement remplis par une autre phase.

Elle dépend alors fortement de la saturation en liquide. Souvent, les auteurs considèrent même que c'est la seule dépendance.

Les perméabilités relatives aux gaz et aux liquides découlent de la notion de perméabilité «effective» (cf. § II.2.2.5) à l'une ou à l'autre de ces phases. Cette perméabilité effective est le produit d'une perméabilité intrinsèque et d'une perméabilité relative [MAYE 92].

Pour un certain niveau de saturation ($S_l = x$), la perméabilité relative au gaz K_{rg} s'obtient en divisant la valeur de la perméabilité intrinsèque mesurée à x degré de saturation (perméabilité effective qu'on peut noter ici par $K_{int(S_l=x)}$), par la valeur de la perméabilité intrinsèque de référence, calculée à partir de la mesure du débit de gaz à l'état sec (à $S_l = 0$). Et la perméabilité relative à l'eau s'obtient en divisant la valeur de la perméabilité intrinsèque à x degré de saturation (perméabilité effective à l'eau notée ici par $K_{l(S_l=x)}$) par la valeur de la perméabilité intrinsèque de référence, calculée à partir de la mesure du débit de l'eau à l'état complètement saturé (à $S_l = 1$).

- La perméabilité relative au gaz

$$K_{rg} = \frac{K_{int(S_l=x)}}{K_{int(S_l=0)}} \quad (\text{II} - 26)$$

- La perméabilité relative à l'eau

$$K_{rl} = \frac{K_{l(S_l=x)}}{K_{l(S_l=1)}} \quad (\text{II} - 27)$$

Le programme expérimental préconisé dans le cadre de cette thèse s'attache à la mesure des perméabilités relatives au gaz K_{rg} et à l'eau K_{rl} des bétons ordinaires étudiés.

II.3. Paramètres influençant la perméabilité du béton

II.3.1. Influence du préconditionnement des échantillons sur la perméabilité

Après la maturation du béton, un conditionnement spécifique est effectué préalablement aux mesures de la perméabilité. Il consiste généralement en une saturation du matériau par le fluide utilisé (gaz ou liquide) lors de l'essai : l'échantillon est saturé sous vide par le liquide de percolation pour un essai de perméabilité au liquide. Mais pour un essai de perméabilité au gaz, l'eau libre contenue dans les pores capillaires doit être évacuée (l'échantillon doit être séché).

Dans le cadre de cette thèse, les matériaux testés au laboratoire sont partiellement saturés. A cet effet, un séchage partiel est nécessaire, préalablement à la mesure de la perméabilité, afin de pouvoir tester des échantillons partiellement saturés (aux taux de saturation S_l variant entre 0 et 1). Il est possible de sécher les échantillons par étuvage [AFPC 97].

II.3.1.1. Influence de la température de séchage

Dans le cas du séchage, il est difficile d'évaluer la quantité d'eau nécessaire à drainer de l'échantillon du béton. Un séchage modéré ne permet pas le drainage des pores les plus fins dans le matériau, et la perméabilité mesurée pourra être surévaluée si le fluide percolant est un gaz, comme elle pourra être sous-évaluée si ce fluide est un liquide (eau par exemple). Par ailleurs, un séchage trop poussé entraîne une dégradation de la microstructure du matériau. Les gradients hydriques générés par les différentes étapes du préconditionnement selon le mode opératoire AFPC-AFREM (étuvage à $T = 80 \pm 5^\circ \text{C}$ et à $T = 105^\circ \text{C}$)

peuvent de plus créer des microfissures superficielles ou amplifier la microfissuration initialement présente dans les éprouvettes [BARO 08]. Cette fissuration peut créer un cheminement préférentiel pour le fluide de percolation, susceptible de contrôler le transfert sous gradient de la pression totale et conduit à une perméabilité artificiellement accrue ou à une surévaluation de la perméabilité intrinsèque du béton. La première conclusion à en tirer est que les valeurs de perméabilité mesurées selon le mode opératoire AFPC-AFREM (i.e. après étuvage à $T = 105^{\circ} \text{C}$), pour un taux de saturation en eau liquide nul, sont susceptibles d'être représentatives des matériaux microfissurés. Entre un séchage modéré à 50°C de quelques jours et un séchage jusqu'à masse constante à 105°C , il est souvent observé des écarts de perméabilité au gaz supérieurs à 10^2 m^2 . La mesure seule de la perméabilité n'est donc pas suffisante pour discriminer des bétons sans modes de préconditionnement défini. Les mesures doivent être accompagnées d'une évaluation de la porosité accessible à l'eau afin d'identifier la perte de masse de l'échantillon à un degré de saturation donné [QUÉN 97], [YSSO 97], [AFPC 97], [ABBA 98].

Le choix de la température est délicat. En effet, une température trop élevée peut engendrer une évaporation de l'eau liée et une modification des hydrates, l'ettringite puis les C-S-H [BARO 94], [PERR 99]. Par ailleurs, la dessiccation du matériau peut entraîner des gradients hydriques importants, à l'origine de retrait de dessiccation et de fissurations. Cependant, la microfissuration engendrée par le séchage ne présente qu'un caractère superficiel et n'affecte pas le cœur de l'éprouvette [YSSO 97]. Il a été vérifié par Ammouche (2008) [AMMO 08] que le préconditionnement selon le mode AFPC-AFREM n'entraînait pas de microfissuration supplémentaire significative, ni pour les bétons ordinaires, ni pour les BHP. Les caractéristiques des microfissures observées (quantifiées par analyse d'image) sur des échantillons témoins ou étuvés d'un béton B35 ($E/C = 0.62$) sont très semblables (fissures très fines et dispersées) [AMMO 08].

À partir des travaux effectués par Hannich [HANN 11] dans le but d'étudier l'influence de la température de séchage sur la perméabilité apparente au gaz des bétons BHP, nous constatons à partir des courbes obtenues - perméabilité apparente en fonction de l'inverse de la pression moyenne - que le passage de 80 à 105°C a engendré une augmentation de la perméabilité pour tous les échantillons des deux BHP (cf. Fig. II-7). La perméabilité apparente à 105°C a doublé (un rapport de $2 \pm 0,2$ a été constaté).

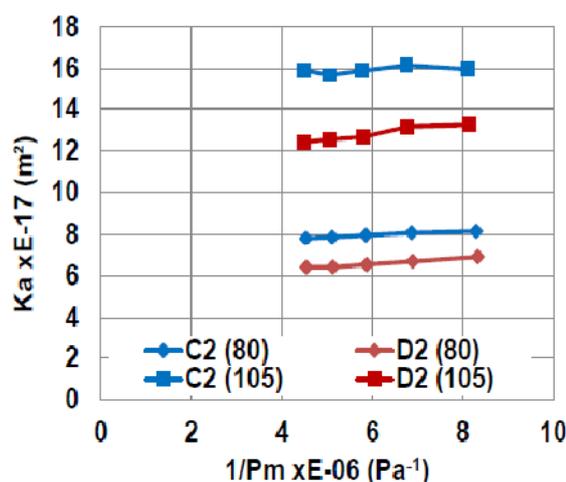


Fig. II-7. Influence de la température de séchage (80 et 105°C) sur la perméabilité apparente en fonction de $1/P_m$ pour deux bétons BHP (notés C2 et D2) [HANN 11].

II.3.1.2. Influence de la procédure de séchage

Différentes procédures de séchage existent [ABBA 98]. Elles se distinguent par leurs objectifs qui doivent satisfaire un souci à la fois de représentativité de l'état hydrique de l'échantillon lors des mesures ; mais aussi de la rapidité et la simplicité d'exécution. Le plus simple préconditionnement consiste à effectuer, avant chaque mesure de perméabilité, un séchage à une température donnée durant un temps fixé. Les températures peuvent s'échelonner de 20° C à 80° C, voir même 105° C, pour atteindre un séchage quasi-complet [AFPC 97], [DHIR 89], [QUÉN 97]. Par ailleurs, plusieurs études établissent des corrélations entre l'augmentation de la perméabilité au gaz et la perte de masse des éprouvettes [ABBA 99], [JACO 98], [LYDO 95]. Entre 50° C et 105° C, la température a pour effet d'accélérer le phénomène de séchage et de diminuer légèrement l'humidité relative environnante (environ 11 % à 50° C et 3 % à 105° C pour une étuve placée dans un laboratoire à 23° C et 50 % d'humidité relative) qui impose finalement des pertes de masses proches, si bien que la perméabilité au gaz d'échantillons séchés à 50° C durant 300 jours tend vers celle mesurée à 105° C [QUÉN 97]. En pratique, si la masse d'un échantillon séché à 105° C est stable (jusqu'à masse constante), c'est-à-dire jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'évaporation d'eau détectée, sa perméabilité peut aussi être considérée comme stabilisée [PERR 92], [TSIM 98].

En outre, on distingue un préconditionnement à taux de saturation fixé, dont le but est de sécher un échantillon jusqu'à un taux de saturation donné pour pouvoir relier la perméabilité en fonction du degré de saturation du matériau. Les degrés de saturation peuvent également être atteints par séchage par palier en atmosphère d'humidité relative contrôlée par des solutions salines [VILL 01]. Ce mode de préconditionnement peut être suivi d'une période de redistribution de l'humidité résiduelle dans l'éprouvette à température modérée [ABBA 99].

Pour la perméabilité au gaz, afin d'évaluer la répartition de l'humidité dans les éprouvettes à l'issue de chaque étape de séchage, le degré de saturation peut être contrôlé localement par gammadensimétrie. Ce contrôle effectué juste avant et après chaque mesure de perméabilité au gaz, montre d'ailleurs que la circulation d'azote par exemple à travers des échantillons de béton partiellement saturés n'a quasiment pas d'influence sur la teneur en eau moyenne, ni sur la répartition d'humidité au sein des échantillons [VILL 01].

S'il n'est pas prévu de phase de redistribution de l'humidité après la phase de séchage, l'apparition de gradients hydriques est difficilement évitable surtout s'il s'agit d'un matériau faiblement perméable [BARO 08]. Des profils de taux de saturation mesurés par gammadensimétrie aux différentes étapes de protocole de préconditionnement AFPC-AFREM sur un béton perméable (B25) et un béton à très haute performance (BH) sont illustrés sur la Fig. II-8. On constate peu de différence entre les taux de saturation mesurés après 7 jours et après 28 jours d'étuvage à $T = 80 \pm 5^\circ \text{C}$ pour le béton B25, surtout dans la zone superficielle de l'éprouvette [BARO 02a]. Par contre, on note une évolution très importante entre 7 et 28 jours d'étuvage pour le béton BH. De plus, même après 28 jours d'étuvage, le taux de saturation reste élevé et le gradient reste très important entre le cœur et la zone superficielle de l'éprouvette du béton BH. Or, les chemins d'écoulement du gaz ne sont pas les mêmes lorsque l'humidité est répartie de façon homogène dans l'éprouvette. La perméabilité au gaz mesurée sera donc différente dans les deux cas.

Cette méthode exige donc des mesures de perméabilité pour différents états de saturation obtenus à l'issue d'étapes de préconditionnement qui doivent aboutir à l'équilibre hydrique des échantillons. Mais cet équilibre, pour un disque du béton de 50 mm d'épaisseur avec une atmosphère donnée nécessite une durée très importante.

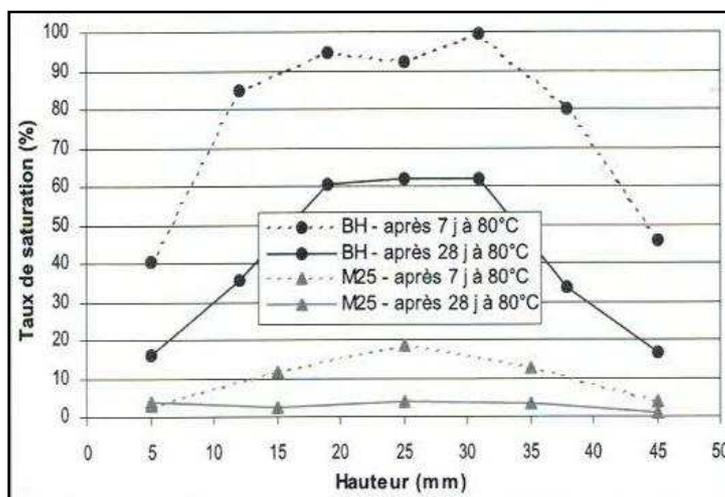


Fig. II-8. Profils de taux de saturation en eau liquide mesurés par gammadensimétrie aux différentes étapes du protocole de préconditionnement AFPC-AFREM [AFPC 97] pour un béton ordinaire M25 et un béton à hautes performances BH [BARO 02a].

II.3.1.3. Choix de la procédure de séchage

La difficulté du préconditionnement est de réaliser le séchage d'une éprouvette, avec une répartition d'humidité la moins hétérogène possible, en engendrant le minimum d'endommagement tout en ayant une durée raisonnable (inférieure à 2 mois). Le préconditionnement pour un taux de saturation fixé est uniforme à des températures en atmosphère d'humidité relative contrôlée par des solutions salines nécessite une procédure très longue, probablement plusieurs années pour les BHP.

Alors, le préconditionnement choisi dans le cadre de cette étude procède d'un séchage par palier dans une étuve à une température fixée afin d'établir des comparaisons de perméabilité selon le taux de saturation des matériaux. Il consiste en plusieurs échéances de séchage de température fixée à 60° C ou 80° C. Chaque échéance de séchage (de 24 h ou de 48 h) s'accompagne d'une mesure de la masse de l'échantillon et de sa perméabilité. Avant d'effectuer une mesure de perméabilité à 20° C, il est nécessaire d'observer une étape à la même température afin que l'échantillon soit en équilibre, et n'échauffe pas le gaz ou l'eau le traversant. Une période de 24 heures dans un dessiccateur à 20° C permet à l'échantillon de refroidir à la température ambiante sans prendre d'humidité. Plus de détails sur les procédures de séchage pour les essais de mesures de la perméabilité à l'eau et au gaz sont donnés dans le paragraphe § III.8.

II.3.2. Influence de la composition du béton sur la perméabilité

II.3.2.1. Influence des agrégats

Il est bien connu que la zone de transition interfaciale (cf. § I.2.3) peut affecter la perméabilité du béton, comme elle est très poreuse et plus sensible à la fissuration (cf. Fig. II-9). Toutefois, lorsque l'échantillon est soumis à un chargement, l'exclusion de gros

granulats dans le mélange est réellement préjudiciable et les résultats augmentent 2 à 3 fois plus le transport des fluides dans le béton [SAMA 92]. Dans la majorité des cas, les agrégats présentent une perméabilité plus faible que la pâte de ciment hydraté et il est clair que la perméabilité du béton dépend plus de la perméabilité intrinsèque de ses composants que de leur interface. Tsukamoto [TSUK 90] a montré que, la présence des agrégats de grande taille a conduit à une baisse de la perméabilité des fluides (cf. Fig. II.10), Ceci souligne l'importance de la microfissuration dans la matrice, par opposition au développement des fissures interfaciales.

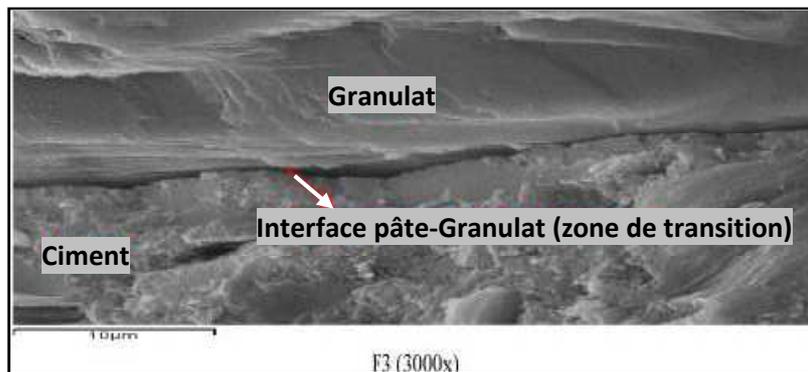


Fig. II-9. Microstructure de la zone de transition interfaciale [SUN 09].

Perraton et Aïtcin (2001) [PERR 01] montrent que la nature minéralogique du granulat joue un rôle déterminant quant à la perméabilité aux gaz d'un béton. La microstructure des bétons confectionnés à partir des deux types de granulats (marbre et granite) se différencie essentiellement au niveau du degré de décollement à l'interface pâte-granulat. Une meilleure cohésion de nature chimique entre la pâte et le granulat de marbre réduit ainsi de façon appréciable la présence de défauts qui modifient substantiellement la perméabilité aux gaz du matériau [PERR 01].

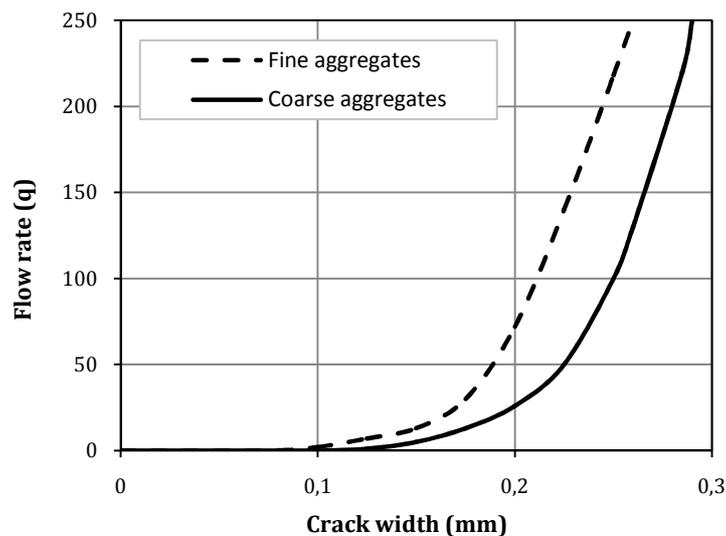


Fig. II-10. Effet de la taille des agrégats sur le débit [TSUK 90].

Il est montré aussi dans les travaux de Seng [SENG 02] que la perméabilité du béton avec des agrégats légers (d'origine argileuse d'une densité de $650 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ et d'une taille qui

varie entre 4 et 8 mm) est inférieure à celle d'un béton avec des agrégats normaux (la profondeur de pénétration de l'eau enregistrée pour le béton contenant des agrégats légers était d'environ un tiers de celle du béton avec des agrégats normaux, après 12 jours sous une pression d'eau de 4 MPa). Cette différence de perméabilité des bétons légers est probablement attribuée à une zone interfaciale entre les agrégats et la matrice plus dense comparée à celle du béton normal.

II.3.2.2. Influence du rapport E/C

La microstructure du béton est non seulement modifiée par la présence de granulats avec les auréoles de transition (cf. § I.2.3), où la porosité est localement plus élevée, mais le rapport E/C du matériau est également un paramètre qui intervient sur la valeur de la porosité, et par voie de conséquence la perméabilité. Les travaux de Nayme et Illston mettent en évidence l'effet du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau d'un matériau à base de ciment Portland (cf. Fig. II-11) [FELD 86]. Comme nous pouvons le constater, la diminution du rapport E/C donne un matériau à porosité réduite, ayant des propriétés plus ou moins accentuées, notamment un rayon de pores plus faible, expliquant ainsi la baisse de perméabilité. En effet, l'essentiel de la porosité capillaire est issue de l'eau restée dans les espaces intergranulaires lors de l'hydratation et qui constitue un réseau d'autant plus important et connecté que le dosage en eau est élevé [AÏTC 01], [NEVI 00], [BARO 92], [LAFH 06]. Cela peut, dans un premier temps, s'expliquer par l'augmentation de la perméabilité de la phase solide de la pâte de ciment qui dépend du degré d'hydratation. Mais l'augmentation de la perméabilité est plus influencée encore par l'augmentation de la porosité de la pâte de ciment. En effet, on le constate pour des rapports E/C supérieurs à 0,5 où la perméabilité de la phase solide est la même pour chaque cas mais avec une fraction volumique de la porosité différente.

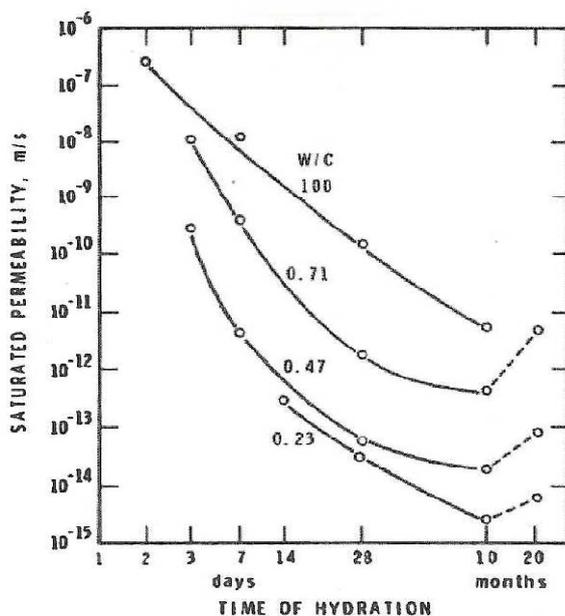


Fig. II-11. Influence du rapport E/C sur la perméabilité mesurée à l'eau [FELD 86].

Les travaux de Gallé *et coll.* [GALL 00] montrent que la perméabilité au gaz d'un béton est dépendante du rapport E/C , ainsi que de la saturation du matériau (cf. Fig. II-12). Une

quantité d'eau importante dans la microstructure du matériau gêne le passage du gaz, réduisant ainsi sa perméabilité. Donc, En plus de l'influence du rapport E/C conditionnant la taille des pores, la saturation en eau liquide est aussi une donnée influente sur la perméabilité du béton.

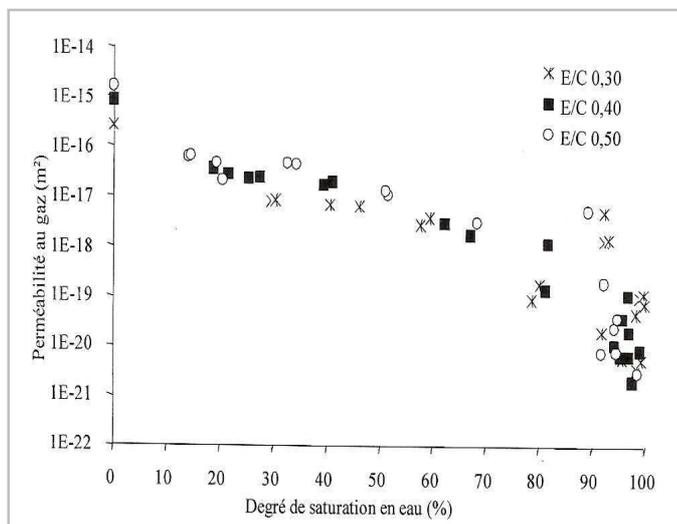


Fig. II-12. Influence du degré de saturation sur la perméabilité au gaz du béton pour des différents rapports E/C [GALL 00].

Caré et Derkx (2011) [CARÉ 11] montrent dans leurs travaux que l'évolution de la perméabilité au gaz des pâtes de ciment en fonction de la saturation est influencée par leurs rapports E/C (cf. Fig. II-13). La perméabilité au gaz d'une pâte de ciment avec un rapport $E/C = 0.2$ est presque nulle pour différents taux de saturation du matériau. C'est le rapport E/C qui gouverne principalement le réseau poreux influençant la perméabilité du matériau.

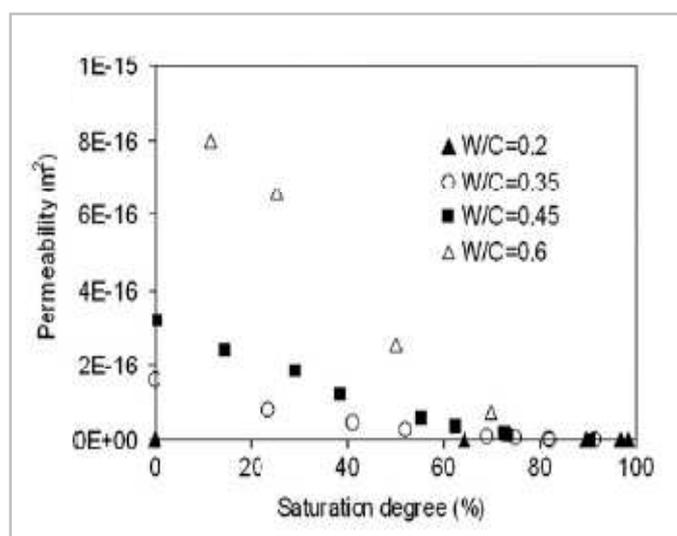


Fig. II-13. Influence du degré de saturation sur la perméabilité au gaz des pâtes de ciment pour des différents rapports E/C [GALL 00].

La Fig. II-14 met en évidence une répartition de la porosité au sein des pâtes de ciment avec différents rapport E/C . Ceci nous amène à définir deux types de pores :

- les premiers, correspondant au pic des grands diamètres sur les courbes de Verbeck et Helmuth (1969) [VERB 69], sont appelés capillaires et dépendent fortement du rapport E/C . Ce sont surtout le volume total et la dimension de ces pores, qui conditionnent la perméabilité du béton et, par suite, les échanges hydriques avec le milieu extérieur.

- Les seconds sont associés au pic des petits diamètres et sont généralement peu affectés par le rapport E/C . Ce type de pores est une caractéristique intrinsèque des hydrates formés et influence peu la perméabilité du béton.

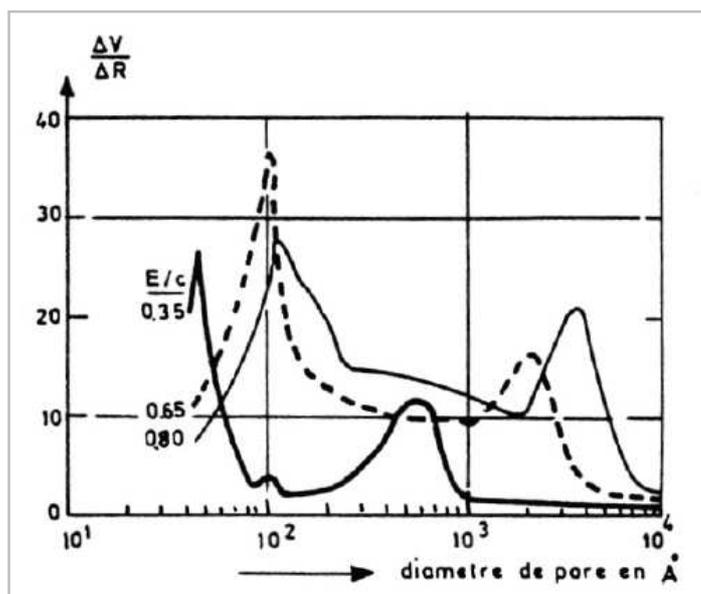


Fig. II-14. Distribution de la taille des pores de pâtes de ciment à divers E/C [VERB 69].

Un matériau cimentaire présente donc une porosité bimodale (avec deux types de pores), caractérisée par le réseau de pores capillaires et celui des hydrates. Par ailleurs, les rayons critiques varient en fait en fonction du degré d'hydratation et du type de ciment [BARO 94].

II.3.2.3. Influence de la nature du ciment

La porosité, tout comme la distribution porale, est influencée par la nature du ciment utilisé. Par conséquent, cette dernière influe également sur la perméabilité. En effet, les différents composants chimiques du ciment anhydre réagissent pour donner différents hydrates dont les compositions et les proportions dans le ciment hydraté conditionnent les propriétés physiques. Les travaux effectués par Perlot (2006) [PERL 06] sur la porosimétrie au mercure de deux mortiers fabriqués à base de ciment CEM I ou CEM V/A (cf. Fig. II-15), montrent que le volume total poreux du mortier à base de CEM V/A est plus important que celui du CEM I. Toutefois, la porosité est plus fine et distribuée sur une taille de pores plus grande. On voit apparaître en dessous de 20 nm, toute la porosité associée aux hydrates.

Ainsi, Perlot (2006) conclue à l'identification de deux modes poreux (distribution bimodale), qui sont dépendants de la nature du ciment utilisé : un premier mode dans la porosité capillaire, pour lequel le CEM I présente plus de pores, et un second mode dans la porosité des hydrates, dominé par le raffinement de porosité du mortier à base de CEM V/A.

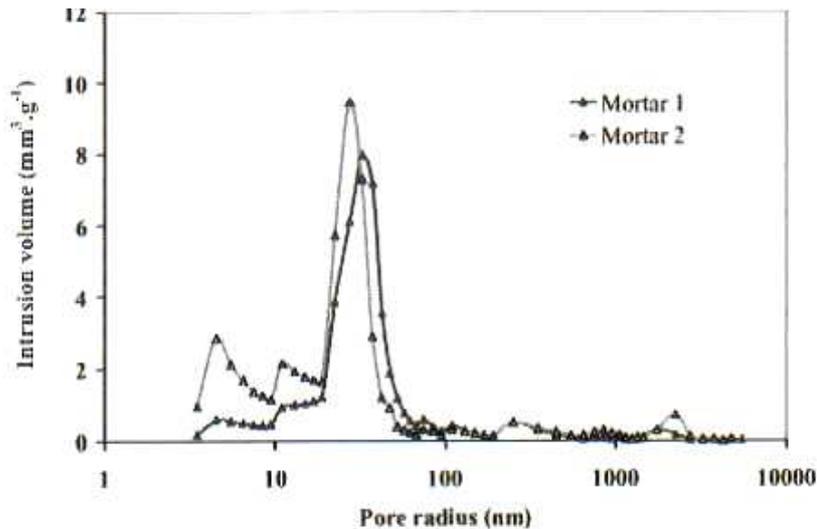


Fig. II-15. Influence de la nature du ciment sur la porosité [PERL 06] (mortier 1: à base de ciment CEM I ; mortier 2: à base de ciment CEM V/A).

Cette distribution de porosité différente entre les deux mortiers est imputée aux additions présentes dans le ciment CEM V/A, qui par réaction pouzzolanique, conduisent à la formation de produits hydratés supplémentaires. Ces C-S-H de composition (rapport calcium/silicium (C/S)) modifiée réduisent alors la proportion de pores capillaires et raffinent la porosité des hydrates du mortier à base de CEM V/A.

À partir des travaux effectués par W. Chen (2011) [CHEN 11], la Fig. II-16 présente la variation des perméabilités effectives au gaz en fonction de la saturation pour deux bétons à base de différents types de ciments (CEM I et CEM V). On peut constater une nette augmentation de la perméabilité effective des deux bétons mesurée lorsque leur saturation en eau diminue. Mais, plus spécifiquement le béton CEM V montre une diminution brutale au début de la désaturation (cf. Fig. II-16). Pour le béton CEM I, la diminution de la perméabilité est quasiment linéaire, et plus progressive que pour le béton CEM V. À perméabilité effective égale, le niveau de saturation du béton CEM I est inférieur à celui du CEM V.

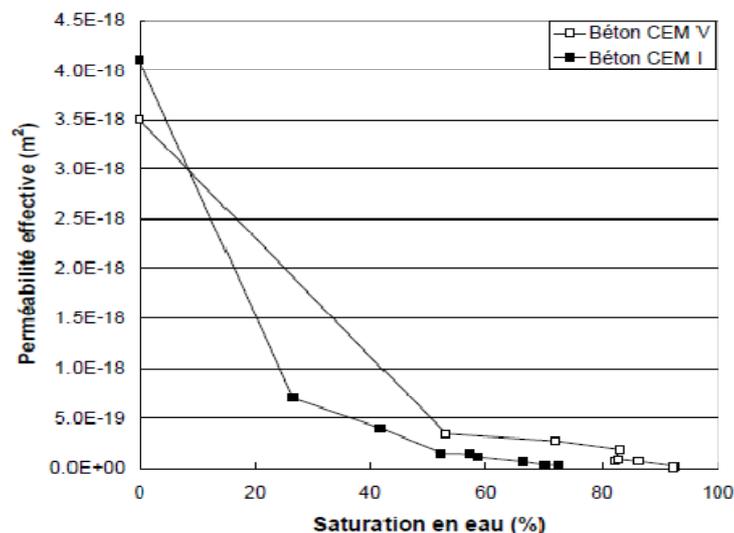


Fig. II-16. Perméabilités effectives au gaz en fonction de la saturation pour des bétons à base de ciments CEM I et CEM V [CHEN 11].

II.3.3. Influence du degré de saturation en eau sur la perméabilité des bétons

L'état de saturation du béton conditionne les propriétés de transfert telle que la perméabilité, ce qui a une grande influence sur la pénétration d'agents agressifs, donc sur la durabilité du béton. En regardant le comportement de l'eau dans le milieu poreux, on comprend pourquoi la perméabilité varie avec la teneur en eau du matériau (cf. Fig. II-17), on a vu la finesse et la complexité du réseau poreux du béton (cf. § I.2.4 et § I.2.5). En effet, l'état hydrique du béton est primordial car, selon le taux de saturation du matériau, différentes tailles de pores sont accessibles à la circulation du gaz [BARO 94]. D'après la physique des transferts, même pour des taux de saturation inférieurs à 100 %, la phase liquide va rester continue dans le milieu [VERD 01]. Tant que cette phase liquide est continue, la perméabilité au gaz ou à l'eau du béton va fortement varier. Cette variation sera d'autant plus grande que le béton sera perméable. Nous pouvons supposer que plus le béton est perméable plus ses pores sont gros. En effet, le béton sèche d'abord par ses gros pores, puis par ses pores les plus fins. Ainsi plus la saturation diminue, plus les petits pores se vident d'eau. Un réseau poreux fortement saturés facilite donc l'écoulement d'eau par perméation. Dans ce cas la perméabilité au gaz devient nulle. Ceci aura par conséquence d'empêcher l'accessibilité d'un certain volume poreux au gaz. Donc, un réseau poreux faiblement saturé facilite le passage des gaz. Dans ce cas, le réseau contient très peu d'eau, il n'y a plus d'empêchement au sein des réseaux de pores, la perméabilité va fortement augmenter. On peut en conclure que la saturation va principalement piloter la perméabilité effective du béton. La perméabilité au gaz augmentera avec le séchage du matériau, contrairement à la perméabilité à l'eau qui augmentera lors d'une imbibition, à cause de la connectivité du réseau poreux (cf. Fig. II-17).

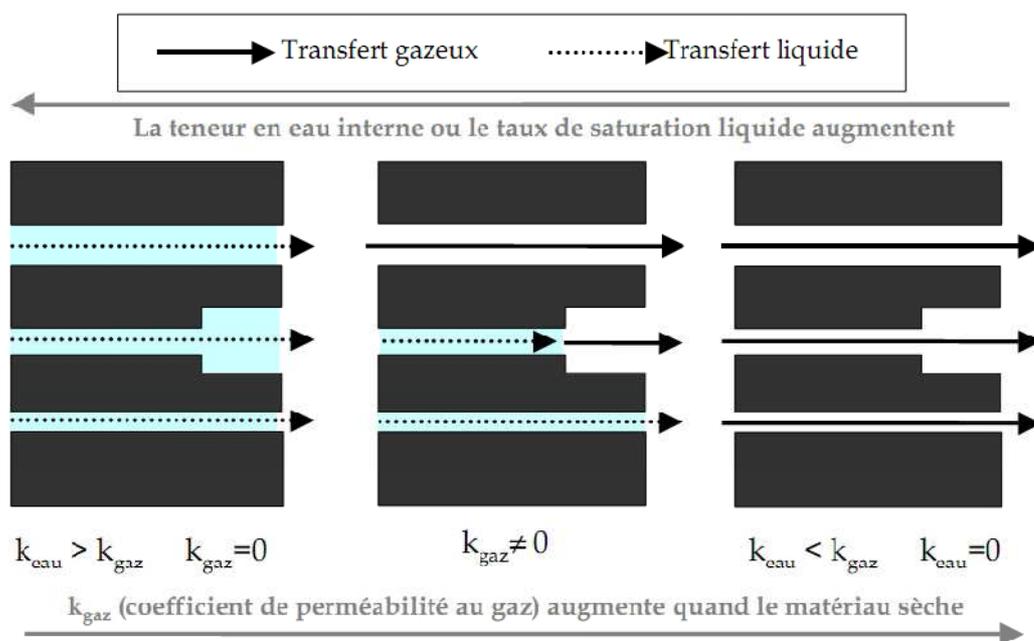


Fig. II-17. Représentation de la connectivité d'un réseau poreux [VERD 01].

Plusieurs études ont été menées, quantitatives ou qualitatives, pour mettre en évidence l'influence de la saturation en eau liquide d'un béton sur ces propriétés de transfert. Abbas

et coll. (1999) [ABBA 99] ont présenté l'influence de la saturation en eau sur la perméabilité au gaz d'un béton (cf. Fig. II-18). La variation totale de la valeur minimum ($0,0025 \text{ E-16 m}^2$) à la valeur maximum ($0,23 \text{ E-16 m}^2$) est proche de 100, (c.-à-d. deux ordres de grandeur). Il montre très clairement que la variation de la perméabilité au gaz dépend fortement de la saturation en eau. Ainsi, Picandet *et coll.* (2001) [PICA 01b] montrent que quel que soit l'état mécanique et la formulation du béton (ordinaire OC, haute performance HPC ou haute performance fibré HPFC), plus la durée de séchage est grande et plus la perméabilité au gaz du béton augmente. La saturation en eau est donc une donnée influente pour la perméabilité.

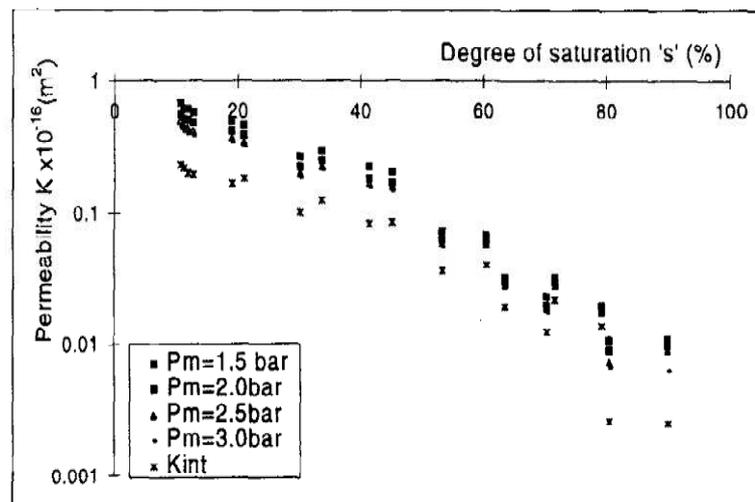


Fig. II-18. Variation de la perméabilité du béton en fonction de la saturation [ABBA 99].

L'influence du taux de saturation sur la perméabilité intrinsèque aux gaz de deux bétons non sollicités (un béton ordinaire pour un ouvrage d'art (BO) et un béton à hautes performances (BH)) a été aussi étudiée expérimentalement par Villain *et coll.* (2001) [VILL 01]. Dans cette étude la méthode de Klinkenberg a été appliquée à différents taux de saturation, afin d'obtenir la perméabilité aux gaz intrinsèque à un degré de saturation S_l donnée.

L'utilisation de deux protocoles de séchage des éprouvettes a permis de couvrir l'ensemble du domaine de S_l pour les deux types de béton analysés (BO et BHP) (cf. Fig. II-19):

- Le mode opératoire AFPC-AFREM [AFPC 97], où les mesures de perméabilité sont réalisées à des échéances imposées au cours d'un étuvage à $T = 80^\circ \text{ C}$ puis à $T = 105^\circ \text{ C}$.
- Le mode opératoire où les mesures sont effectuées après séchage à différents paliers d'humidité relative imposée à $T = 45^\circ \text{ C}$ à l'aide de solutions salines saturées.

Il est ainsi possible de déduire de ces expériences une courbe $K_{rg} = K_{rg}(S_l)$ pour chaque matériau testé (cf. Fig. II-19), où K_{rg} est la perméabilité relative au gaz.

Le taux de saturation joue un rôle fondamental vis-à-vis des propriétés de transport. Ainsi, par exemple, la perméabilité aux gaz d'une éprouvette de béton augmente quand le taux de saturation moyen diminue [PARR 94], [JACO 98], [ABBA 99], [VILL 01].

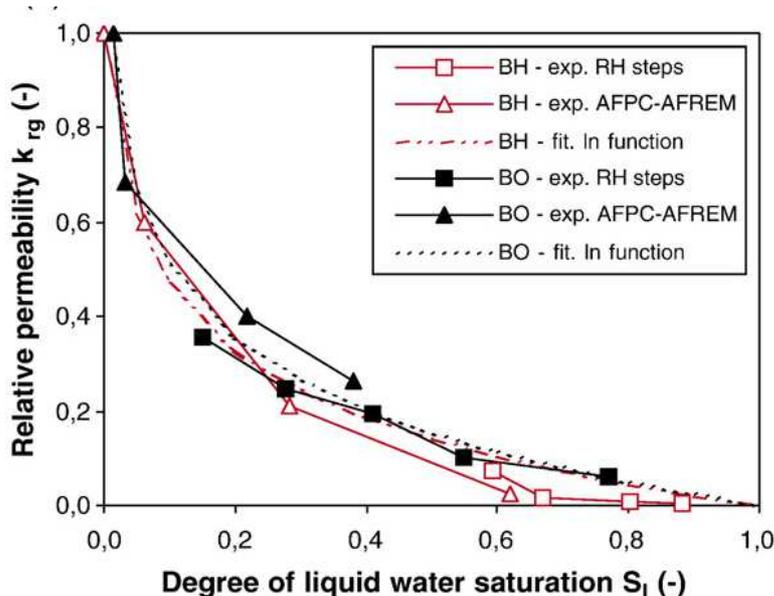


Fig. II-19. Evolution de la perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation en eau liquide pour deux bétons BO et BHP. [VILL 01].

II.3.4. Modèles prédictifs proposés pour le calcul de K_{rl} et K_{rg}

De par la difficulté des expériences de mesures de la perméabilité à l'eau des bétons, et à fortiori, de leur perméabilité relative aux liquides, rares sont les travaux concernant cette détermination pour les matériaux cimentaires. La perméabilité relative à l'eau liquide (K_{rl}) et la perméabilité relative au gaz (K_{rg}) peuvent également être déduites des isothermes de désorption et d'adsorption de vapeur d'eau grâce à des formules analytiques proposées dans la littérature. Différentes relations empiriques sont présentées sur la Fig. II-20.

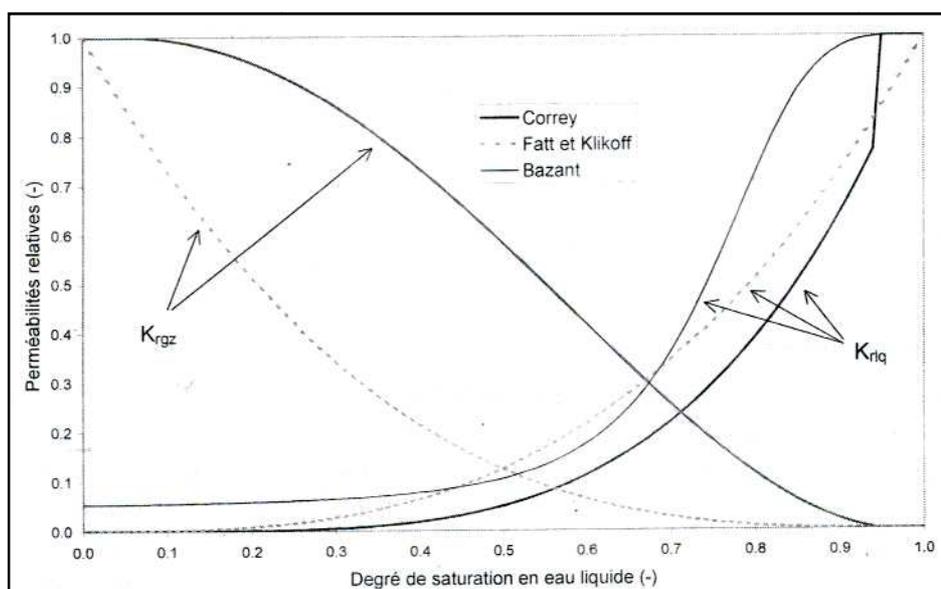


Fig. II-20. Exemples de relations empiriques traduisant les perméabilités relatives d'un milieu poreux [BILL 03]

- Modèle de Correy (1954), cité par Maréchal et Beaudoux. (1992) [MARÉ 92] :

$$K_{rl} = \left[\frac{(S_l - 0,05)}{(1 - 0,05)} \right]^4 \quad (\text{II} - 28)$$

$$K_{rg} = \left[1 - \left(\frac{(S_l - 0,05)}{(1 - 0,05)} \right)^2 \right] \cdot \left[1 - \left(\frac{(S_l - 0,05)}{(0,05 - 1)} \right)^2 \right] \quad (\text{II} - 29)$$

- Modèle de Fatt et Klikoff (1959), cités par Udell (1985) [UDEL 85] :

$$K_{rl} = S_l^3 \quad (\text{II} - 30)$$

$$K_{rg} = (1 - S_l)^3 \quad (\text{II} - 31)$$

- Modèle de Bazant et Thonguthai (1978) [BAZA 78] :

$$K_{rl} = \alpha + \frac{(1 - \alpha)}{\left[1 + \left(\frac{(1 - hr)}{(1 - hr_c)} \right)^4 \right]} \quad (\text{II} - 32)$$

Avec $\alpha = 0,05$ à 25° C et hr : humidité relative ($hr = P_v/P_{vs} = W/W_s = S_l$ à 25° C), et $hr_c \approx 0,75$.

DiCarlo (2003) [DiCA 03] et Sheng *et coll.* (2003) [SHEN 03] proposent pour les sols non saturés une expression de la perméabilité relative fonction du degré de saturation, basée sur les travaux de Van Genuchten (1980) [VAN-G 80] et Hillel (1971) [HILL 71]. La perméabilité à l'eau s'écrit alors :

$$K_{rl} = S_l^m \quad (\text{II} - 33)$$

avec $m = 5$ dans la première étude (de DiCarlo (2003)) et $m = 2$ dans la seconde (de Sheng *et coll.* (2003)). Néanmoins, ce type de relation, appliquée pour le comportement des sols, n'a pas été validé pour les bétons.

Les relations les plus largement utilisées, dans l'étude des milieux poreux, entre le degré de saturation et la succion capillaire sont données par Brooks et Corey (1964) [BROO 64] et plus récemment par Van Genuchten (1980) [VAN-G 80].

Grasberger et Meschke (2000) [GRAS 00], Baroghel-Bouny *et coll.* (1999) [BARO 99] ou Mainguy *et coll.* (2001) [MAIN 01b] se basent sur les relations définies par Van Genuchten (1980) [VAN-G 80] pour décrire l'évolution de la perméabilité relative en fonction du degré de saturation. Il a été montré expérimentalement que K_{rl} est relativement indépendante de la nature du liquide utilisé si ce liquide ne s'adsorbe pas sur le solide poreux.

Van Genuchten [VAN-G 80] propose une expression qui dépend seulement de la saturation S_l . Pour établir cette formule, il est parti du modèle développé par Mualem (1976) [MUAL 76] (représentation de la porosité du milieu comme un ensemble de billes de rayon distinct interconnectées entre elles, *Bundle Capillary Tube Model*) qui a montré expérimentalement qu'on peut relier la perméabilité relative K_{rl} dans un sol partiellement saturé avec un degré de saturation S_l aux mesures expérimentales de la pression capillaire

entre la phase liquide et la phase gazeuse. Mualem [MUAL 76] a abouti à la relation sous forme intégrale suivante :

$$K_{rl}K_{rl}(S_l) = \sqrt{S_l} \cdot \left(\frac{\int_0^{S_l} \frac{dS}{P_c(S)}}{\int_0^1 \frac{dS}{P_c(S)}} \right)^2 \quad (\text{II} - 34)$$

Van Genuchten a utilisé ensuite la relation liant la pression capillaire à la saturation liquide. La courbe de la pression capillaire $P_c = P_c(S_l)$ peut être déduite des expériences de désorption isotherme [BARO 99]. Dans cette approche, la pression capillaire P_c , est donnée, à partir de considérations statistiques (distribution de la taille des pores) par :

$$P_c(S_l) = a(S_l^{-b} - 1)^{\frac{1}{b}} \quad (\text{II} - 35)$$

Cette relation, découlant de l'approche de Van Genuchten-Mualem, sera utilisée pour le calage des courbes expérimentales d'adsorption ou de désorption obtenus (cf. § 1.2.3), où a et b sont deux paramètres à caler. Ils dépendent de la composition et de la nature du matériau ciment ou béton et sont déterminées par des essais expérimentaux. À partir des travaux de Mainguy (1999) [MAIN 99], les courbes issues de calage sont présentées sur la Fig. II-21 pour un béton ordinaire.

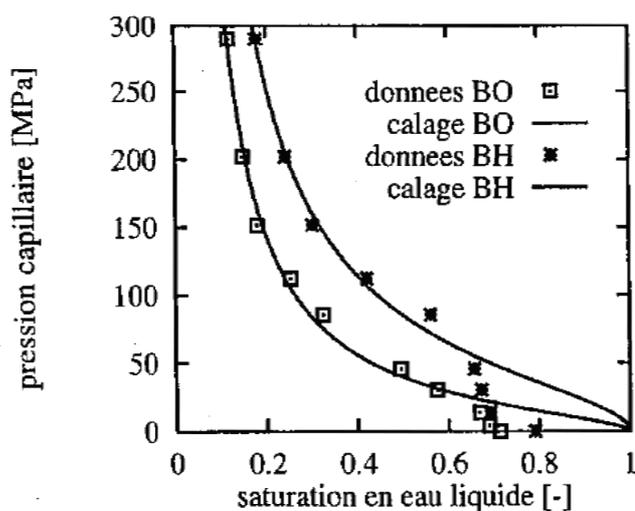


Fig. II-21. Relation pression capillaire-saturation pour les bétons BO et BHP [MAIN 99].

D'après la littérature, quelques valeurs des coefficients a et b dans l'équation précédente (Eq. (II-35)), obtenues expérimentalement pour différents matériaux cimentaires, sont présentées dans le Tab II-1. (B) et (C) sont représentatifs du béton et de la pâte de ciment, ordinaire (O) ou à haute performance (HP).

Tab. II-1. Paramètres a et b à température ambiante [MAIN 99].

Coefficients	Matériaux cimentaires			
	BO ($E/C = 0.49$)	BHP ($E/C = 0.27$)	CO ($E/C = 0.35$)	CHP ($E/C = 0.2$)
a (MPa)	18.6237	46.9364	37.5479	96.2837
b (-)	2.2748	2.0601	2.1683	1.9540

L'expression de la relation pression capillaire-saturation (Eq. (II-35)) peut être utilisée pour calculer les expressions des perméabilités relatives à l'eau et au gaz. L'intégration donne ensuite la formule (Eq. (II-36)) proposée par Van Genuchten [VAN-G 80] pour décrire la perméabilité relative à l'eau (cf. Fig. II-22).

$$K_{rl} = \sqrt{S_l} \left(1 - (1 - S_l^b)^{\frac{1}{b}} \right)^2 \quad (\text{II} - 36)$$

avec $m = 1 / b$ et b le paramètre présenté dans le Tab. II-1. Souvent b est pris presque égal à 2 comme une moyenne des valeurs trouvées dans la littérature. Donc, m est souvent prise égale à 0.5. La relation (Eq. (II-36)) peut être écrite sous la forme suivante :

$$K_{rl} = \sqrt{S_l} \left(1 - \left(1 - S_l^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (\text{II} - 37)$$

En outre, Savage et Jenssen [SAVA 97] ont montré que cette formule, à l'origine développée en science des sols, pouvait être appliquée aux matériaux à base de ciment. Cette formule a été appliquée aux différents matériaux cimentaires ordinaire et à haute performance dans le cadre de la modélisation du séchage du béton [BARO 99], [BARO 01] et en particulier dans le cadre de la thèse de Marc Mainguy [MAIN 99] et dans les travaux sur le séchage du béton réalisés par Coussy (2000) [COUS 00].

Comme dans le cas de K_{rl} , on trouve dans la littérature des formules analytiques pour la perméabilité relative au gaz K_{rg} ($K_{rg}(S_l) = 1$ quand $S_l = 0$, matériau sec). La perméabilité relative au gaz K_{rg} est donc une fonction empirique décroissante de S_l (cf. Fig. II-22). Cette fonction est inspirée du modèle de Van Genuchten-Mualem:

$$K_{rg} = (1 - S_l)^q \cdot \left(1 - S_l^{1/m} \right)^{2m} \quad (\text{II} - 38)$$

Où m est le même paramètre que dans la formule de K_{rl} (Eq. (II-37)) et q est un autre paramètre d'ajustement.

- Selon Parker *et coll.* [PARK 87], $q = 0,5$. Parker *et coll.* (1987) ont trouvé cette expression en étendant le modèle de Mualem (1976) [MUAL 76] à la phase non-mouillante, dans le cas des sols. Les perméabilités relatives sont alors données par :

$$K_{rl} = \sqrt{S_l} \left(1 - \left(1 - S_l^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad (\text{II} - 39)$$

$$K_{rg} = \sqrt{1 - S_l} \cdot \left(1 - S_l^{1/m} \right)^{2m} \quad (\text{II} - 40)$$

La Fig. II-22 donne l'exemple de courbes de perméabilités relatives à l'eau et au gaz obtenues par Mainguy [MAIN 99] suivant cette approche respectivement à l'aide des expressions (Eqs. (II-39) et (II-40)); le coefficient b est ici égal à 2.27 (c.à.d. $m = 0.44$) et le béton concerné est de type ordinaire avec un rapport $E/C = 0.49$ (donné sur le Tab. II-1).

L'application de la formule proposée par Parker *et coll.* [PARK 87] pour le calcul de K_{rg} , à l'origine développée pour les sols, ne semble pas appropriée pour les matériaux cimentaires ordinaires ou à haute performance [BARO 99], [BARO 01].

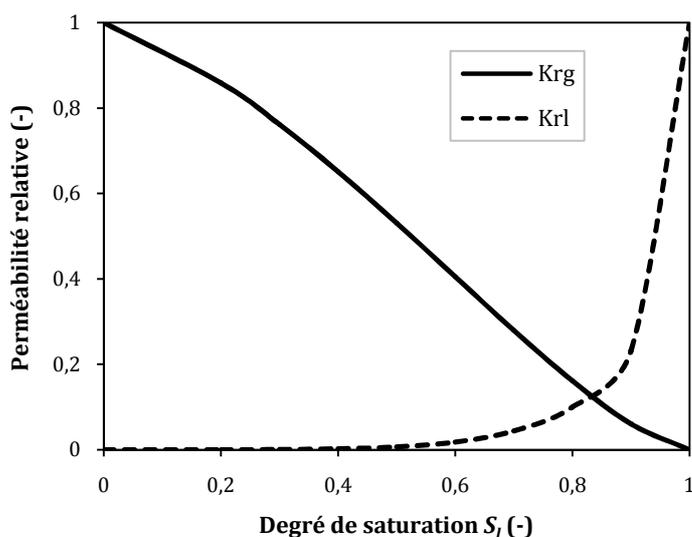


Fig. II-22. Perméabilité relative pour un béton ordinaire ($E/C = 0.49$) [MAIN 99].

- Selon Monlouis-Bonnaire *et coll.* [MONL 04], $q = 5.5$. Ils remettent en cause l'application des Eqs. (II-39) et (II-40) pour les matériaux cimentaires et proposent alors une modification de la valeur de q . Ainsi,

$$K_{rl} = S_l^{5.5} \left(1 - \left(1 - S_l^{\frac{1}{m}} \right)^m \right)^2 \quad (\text{II} - 41)$$

$$K_{rg} = (1 - S_l)^{5.5} \cdot \left(1 - S_l^{1/m} \right)^{2m} \quad (\text{II} - 42)$$

La Fig. II-23 donne les courbes : perméabilité relative au gaz – saturation, obtenues avec les formules (Eqs. (II-40) et (II-42)).

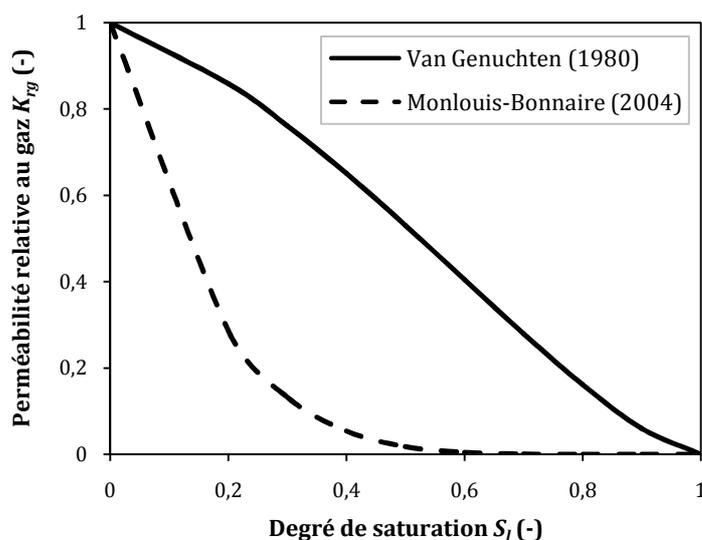


Fig. II-23. Évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation en eau. Relation de Van Genuchten ($q = 0.5$) [VAN-G 80] et Monlouis-Bonnaire ($q = 5.5$) [MONL 04].

Les résultats analytiques obtenus pour la perméabilité relative aux gaz $K_{rg}(S_l)$ avec le modèle analytique proposé par Monlouis-Bonnaire [MONL 04] (cf. Eq. (II-42)), ainsi que

l'évolution de la perméabilité relative à l'eau liquide (K_{rl}) calculée par la formule analytique donnée par Van Genuchten [VAN-G 80] (cf. Eq. (II-40)) en fonction du degré de saturation (S_l) de l'éprouvette, sont présentés dans la Fig. II-24 pour des bétons M25, BO et BHP d'après [BARO 07b].

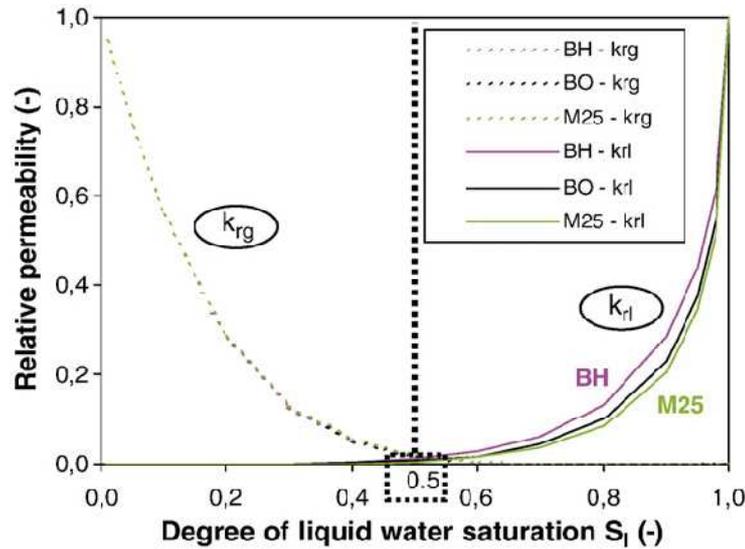


Fig. II-24. Évolution de la perméabilité relative à l'eau liquide et aux gaz pour les bétons M25, BO et BHP, d'après [BARO 07b].

Ainsi, compte tenu des différences significatives entre les deux relations de la perméabilité relative (au gaz et à l'eau) en fonction de la saturation (cf. Eqs. (II-39) et (II-40)), dans le cadre de cette thèse on va s'attacher à valider pour nos bétons étudiés, à partir d'essais expérimentaux, l'écriture de la loi perméabilité relative à l'eau et aux gaz – degré de saturation en eau liquide. Alors, la validation de ces formules analytiques citées ci-dessus sera vérifiée dans la suite du document pour différentes valeurs de paramètre q et avec une valeur de $m = 0.5$. Cette valeur "moyenne" est en accord avec la littérature (cf. Tab. II-2) et permet d'utiliser les relations (II-39) et (II-40) en l'absence de résultats expérimentaux.

Tab. II-2. Définition du paramètre m dans la littérature pour différents bétons ; ordinaire (BO) et à haute Performance (BHP), 1 : Baroghel-Bouny et coll. (1999), 2 : Mainguy et coll. (2001), 3 : Monlouis-Bonnaire et coll. (2004), 4 : Dal Pont et coll. (2004).

Paramètre	1 (BO)	1 (BHP)	2 (BO)	3 (BO)	4 (BO)	Moyenne
m	0.44	0.49	0.44	0.56	0.51	≈ 0.5

II.3.5. Résumé des différentes tailles d'échantillons testés en perméabilité

En l'absence d'une méthode d'essai standard, dans la littérature plusieurs études de recherche ont été effectuées pour la détermination de la perméabilité aux gaz et à l'eau des matériaux cimentaires en utilisant également diverses techniques et méthodes de mesure qui sont actuellement disponibles comme le perméamètre "CEMBUREAU" (avec une charge constante) pour la mesure de la perméabilité au gaz, ainsi que le perméamètre HASSLER à haute pression ou des cellules triaxiales associées à un système de mesure suffisamment précis permettent de mesurer des valeurs de perméabilité à l'eau liquide de l'ordre de $E-22 \text{ m}^2$ [EL-DI 95].

Pour le béton durci, la perméabilité est souvent mesurée dans le laboratoire sur échantillons moulés ou carottés (prélevées) à partir de la structure. En conséquence, on trouve des rapports sur la perméabilité à l'eau et de gaz en utilisant des échantillons testés avec différentes tailles. Un résumé des différents échantillons testés avec différentes tailles sont présentés dans le **Tab. II-3**.

La question qui se pose ici est : si les échantillons testés dans les différentes recherches effectuées jusqu'à aujourd'hui, n'ont pas la même taille, y a - il un effet de la taille de l'échantillon testé sur la mesure de la perméabilité du béton ?

Tab. II-3. Tableau récapitulatif des échantillons testés avec différentes tailles [KAME 14].

Auteur	Fluide percolant	Taille de l'échantillon testé	Remarques
Picandet [PICA 01a]	Eau liquide et Gaz nitrogène	D = 110 mm, H = 50 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillon cylindrique du béton • Écoulement longitudinal du gaz et de l'eau
Caré & Derks [CARÉ 11]	Gaz nitrogène	D = 70 mm, H = 25 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillon cylindrique du mortier • Écoulement longitudinal du gaz
Hearn & Lok [HEAR 97]	Gaz nitrogène	D = 110 mm, H = 20 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillon cylindrique du béton HP • Ecoulement longitudinal du gaz
Sugiyama <i>et coll.</i> [SUGI 96]	Gaz argon	D = 37 mm, H = 70 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillons cylindriques du béton ordinaire et HP obtenus par carottage • Écoulement longitudinal du gaz
Masse <i>et coll.</i> [MASS 98]	Gaz nitrogène	$D_{ext} = 150$ mm, $D_{int} = 35$ mm, H = 375 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillon cylindrique creux du béton • Ecoulement radial du gaz
Laghcha [LAGH 06]	Gaz nitrogène	D = 150 mm, H = 50 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillon cylindrique du béton • Écoulement longitudinal du gaz
Choinska [CHOI 06]	Gaz nitrogène	$D_{ext} = 110$ mm, $D_{int} = 25$ mm, H = 220 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillon cylindrique creux du béton • Ecoulement radial du gaz
Gonilho Pereira <i>et coll.</i> [GONI 09]	Gaz oxygène	D = 40 mm, H = 50 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillons cylindriques du mortier et du béton ordinaire obtenus par carottage • Écoulement longitudinal du gaz
Kermani [KERM 91]	Eau liquide	D = 37 mm, H = 70 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillon cylindrique du béton • Écoulement longitudinal de l'eau
Tsvivilis <i>et coll.</i> [TSIV 03]	Gaz nitrogène	D = 100 mm, H = 50 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Échantillon cylindrique du béton • Écoulement longitudinal du gaz

Dans le cadre du programme expérimental du travail que nous comptons effectuer dans cette thèse, nous mettrons en évidence l'effet de la taille de l'échantillon sur la mesure de la perméabilité aux gaz et à l'eau du béton en fonction du degré de saturation.

II.4. Conclusions

La perméabilité apparente ou intrinsèque (à l'eau liquide ou aux gaz) est un paramètre fondamental dans les lois théoriques qui régissent les transferts de fluide dans les bétons. Ce paramètre est accessible expérimentalement à partir d'essais de laboratoire, par exemple à l'aide de dispositif CEMBUREAU pour la mesure de la perméabilité au gaz en régime permanent. Au titre de la pertinence théorique dans la quantification et la prévision de la durabilité du béton armé, et au titre de l'accessibilité expérimentale, il est donc justifié de qualifier la perméabilité à l'eau liquide et la perméabilité aux gaz d'indicateurs de durabilité généraux (cf. **Annexe A**). On retiendra l'influence prépondérante du taux de saturation en eau liquide (paramètre complémentaire) sur la perméabilité aux gaz et à l'eau liquide.

L'analyse des résultats obtenus dans les différents travaux répertoriés dans ce chapitre, met en évidence l'influence du mode de préconditionnement sur les gradients d'humidité dans les éprouvettes du béton, ainsi que l'influence de la microstructure des bétons étudiés sur l'évolution du taux de saturation. Finalement l'état hydrique des bétons conditionne les paramètres de transfert comme la perméabilité.

Chapitre III. Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.

Sommaire

III.1. Introduction.....	83
III.2. Choix des matériaux et confection des éprouvettes.....	84
III.2.1. Le ciment.....	84
III.2.2. Les granulats.....	85
III.3. Mise en place, cure et préparation des échantillons.....	86
III.3.1. Mise en place.....	86
III.3.2. Cure.....	86
III.3.3. Préparation des échantillons.....	87
III.4. Caractéristiques mécaniques du béton.....	88
III.5. Mesure de la porosité accessible à l'eau.....	89
III.6. Porosimétrie par intrusion de mercure (PIM).....	90
III.7. Mesure de la perméabilité au gaz.....	91
III.7.1. Dispositif de mesure de la perméabilité au gaz.....	91
III.7.2. Protocole de mesure de la perméabilité au gaz.....	92
III.8. Mesure de la perméabilité à l'eau.....	94
III.8.1. Dispositif de mesure de la perméabilité à l'eau.....	94
III.8.2. Protocole de mesure de la perméabilité à l'eau.....	96
III.9. Le préconditionnement.....	98
III.10. Plan expérimental.....	100

Chapitre III. Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.

III.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons présenter les procédures relatives à la préparation et la confection des bétons testés, ainsi qu'une description des méthodes expérimentales préconisées, principalement les techniques utilisées pour la mesure de la perméabilité au gaz et à l'eau liquide. Les résultats obtenus nous permettront de comparer les différents bétons ordinaires étudiés sur le plan de cet important indicateur de durabilité qu'est la perméabilité.

Nous avons formulé quatre bétons ordinaires dont trois présentent la même composition que le béton de référence que nous utilisons au sein de l'équipe de recherche 'Matériaux granulaires' du laboratoire EOLE et qui a fait l'objet de la thèse de doctorat du Dr. Boukli Hacène (2010) [BOUK 10] ; mais avec des rapports E/C différents et/ou à base de ciments de classes de résistance différentes. Le quatrième béton ordinaire est un béton de site dont la composition est spécifique car elle a été utilisée dans la construction du Viaduc de Sidi-Senouci (W. Tlemcen) réalisé en 2013 dans le projet de chemin de fer – *Nouveau dédoublement électrifié Tlemcen-Oued Tlélat*. Il est clair, que la confection de ce béton au laboratoire conduit à certaines différences par rapport au site. Nous rappelons que ce BO se situe dans la gamme des bétons utilisés pour la réalisation des ouvrages d'art.

Les bétons ordinaires testés sont à base de matériaux de la région de Tlemcen. Les travaux expérimentaux élaborés ont été effectués dans le but d'observer et d'identifier les caractéristiques de transfert du matériau béton en fonction de son état hydrique (degré de saturation). Le choix des paramètres de transfert étudiés, tient compte de l'équipement et du savoir-faire expérimental des laboratoires EOLE (*Tlemcen, Algérie*) et GeM (*Nantes, France*).

III.2. Choix des matériaux et confection des éprouvettes

III.2.1. Le ciment

Dans le cadre de cette thèse, les quatre bétons étudiés ont été confectionnés au laboratoire EOLE (Université de Tlemcen). Les trois bétons notés : B30, B35, B40 sont à base d'un ciment CEM II/A 42,5. Le béton noté B32 est à base d'un ciment CEM II/A 32,5. Ces deux ciments (de même type ; mais de différentes classes de résistance) utilisés dans la fabrication de nos bétons sont des ciments Portland composés de la Cimenterie de Béni-Saf (Nord Ouest Algérien). Ce ciment composé (CEM II/A) est le plus utilisé dans le domaine de la construction dans toute la région de Tlemcen. Les compositions chimiques et minéralogiques de ces ciments sont présentées dans le **Tab. III-1** et leurs caractéristiques physiques sont consignées sur le **Tab. III-2**. Les analyses chimiques et les compositions minéralogiques ont été réalisées dans le laboratoire d'analyse de la cimenterie et l'étude des caractéristiques physico-mécaniques des ciments a été conduite au laboratoire EOLE (Université de Tlemcen).

Tab. III-1. Compositions chimiques et minéralogiques des deux ciments testés.

Composition chimique (%)			Composition Bogue (%)		
Composants	CEM II/A 42,5	CEM II/A 32,5	Composants	CEM II/A 42,5	CEM II/A 32,5
SiO ₂	24.82	28.48	C ₃ S	55.65	55.06
Al ₂ O ₃	5.62	4.19	C ₂ S	20.18	21.01
Fe ₂ O ₃	3.07	3.77	C ₃ A	9.71	4.73
CaO	61	56.26	C ₄ AF	9.33	11.46
MgO	0.74	0.89	Gypse	5,27	3.31
SO ₃	2.45	1.54			
CaO libre	0.94	0.57			
Perte au feu	1.71	1.88			

Tab. III-2. Caractéristiques physiques des ciments Portland CEM II/A 42,5 et CEM II/A 32,5.

		CEM II/A 42,5	CEM II/A 32,5
Ciment anhydre	Masse volumique absolue (g/cm ³)	3.011	2.986
	Masse volumique apparente lâche (g/cm ³)	1.047	1.031
	Masse volumique apparente compacte (g/cm ³)	1.761	1.737
	Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	2705	2671
Pâte du ciment	Consistance (%)	28	26.6
	Début de prise (heure)	2h40min	2h52min
	Fin de prise (heure)	6h	6h15min

Les masses volumiques (apparente et absolue) des ciments utilisés, déterminées selon la norme NF P 18-558, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 (Norme Algérienne, 1992) [N.A. 92], compris entre 0.900 – 1.100 g/cm³ pour la masse volumique apparente et 2.900 – 3.150 g/cm³ pour la masse volumique absolue. Le CEM II/A 32.5 se caractérise par une plus faible teneur en Al₂O₃ et par conséquent à une faible teneur en C₃A, ce qui conduit à un temps de prise (début et fin de prise) légèrement retardé.

III.2.2. Les granulats

Les agrégats utilisés (gravier et sable) sont issus du concassage d'un calcaire dur de Djebel-Abiod dont la carrière appartient à l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) à Sidi-Abdelli (Wilaya de Tlemcen). Ce choix a été déterminé par le fait que l'ENG reste le principal fournisseur en granulats de toute la région. Ces réserves sont suffisantes pour une production annuelle d'environ 500.000 tonnes pour les 50 ans à venir [TCHE 88]. Le béton de site B40 est formulé avec deux granulométries de sable, un sable concassé de Sidi-Abdelli (0-4 mm) et un sable de mer (0-1 mm) qui provient de la sablière de Terga (Wilaya de Aïn-Temouchent) qui est un sable roulé de nature siliceuse. Les propriétés physiques des différents granulats sont présentées dans le Tab. III-3. Tous les essais de laboratoire effectués dans cette partie du programme expérimental ont été conduits selon les normes internationales.

Tab. III-3. Propriétés physiques des granulats.

	Sable siliceux, 0-1	Sable calcaire, 0-4	Gravillon 4-8	Gravier 8-16	Gravier 16-25
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1470	1426	1355	1423	1374
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2610	2500	2587	2587	2565
Equivalent sable (%)	91	64	-	-	-
Module de finesse	0.83	2.95	-	-	-
Teneur en fines (%)	3	17	-	-	-
Essai Los Angeles (%)	-	-	27	31	31
Essai d'usure micro Deval (%)	-	-	15	11	8

Les bétons B30, B32 et B35 ne sont pas adjuvantés, par contre un adjuvant plastifiant (Sika Viscocrete 3045 (cf. *Annexe C*)) a été utilisé dans la formulation du béton B40. Ce plastifiant, ajouté à l'eau de gâchage, a été utilisé avec un pourcentage de 1,1 % de la masse du ciment.

Pour la formulation du béton, notre choix s'est porté sur la méthode dite "Dreux-Gorisse" [DREU 83]. Cette méthode a l'avantage d'être issue de nombreuses formulations ayant été testées sur chantier et ayant donné satisfaction sur la base des résultats mécaniques obtenus. Le détail de chacune des compositions est reporté dans le Tab. III-4.

Tab. III-4. Composition des bétons étudiés.

Constituants	Quantités (kg/m ³)			
	B30	B32	B35	B40
Ciment CPJ-CEM II/A 42,5	350	-	350	400
Ciment CPJ-CEM II/A 32,5	-	350	-	-
Gravier calcaire 16/25 (ENG)	533	533	533	236
Gravier calcaire 8/16 (ENG)	432	432	432	398
Gravillon calcaire 4/8 (ENG)	144	144	144	452
Sable calcaire 0/4 (ENG)	660	660	660	514
Sable siliceux 0/1 (Terga)	-	-	-	178
Eau du robinet (Chetouane)	210	175	175	180
Plastifiant (Sika Viscocrete 3045)	-	-	-	5.6
Rapport E/C	0.6	0.5	0.5	0.45
Rapport G/S	1.68			1.57

III.3. Mise en place, Cure et préparation des échantillons

III.3.1. Mise en place

Les bétons étudiés ont été confectionnés au sein du pôle de Technologie à Chetouane (Laboratoire EOLE). Les constituants du béton après séchage à l'étuve, ont été introduits dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie. Le mélange à sec a duré pendant 1 minute, puis l'eau et/ou l'adjuvant ont été introduits en 1 minute et le malaxage a été poursuivi durant trois minutes supplémentaires en vue d'homogénéiser le produit.

Les essais de caractérisation du béton à l'état frais sont réalisés juste après la vidange du malaxeur, tels que l'essai d'affaissement au cône d'Abrams (essai de maniabilité) selon la norme NF P 18-451, ainsi que la détermination de la masse volumique apparente du béton et le pourcentage d'air occlus grâce à l'aéromètre suivant la norme NF P 18-353. Les résultats obtenus à l'issue de ces essais sont reportés sur le **Tab. III-5**.

Dans cette campagne expérimentale et dans le but d'étudier l'effet d'échelle sur la mesure de la perméabilité, des éprouvettes cylindriques de trois tailles différentes (15 x 30) cm, (11 x 22) cm et (5 x 10) cm ont été confectionnées. Les éprouvettes de 15 et 11 cm de diamètre ont été fabriquées dans des moules en acier et les éprouvettes de 5 cm de diamètre sont obtenues par carottage appliqué sur les éprouvettes (15 x 30) cm (cf. § III.3.3).

Lors de la confection, les moules (15 x 30) cm, (11 x 22) cm ont été remplis avec du béton en trois couches. Le serrage y est appliqué en deux temps : par piquage de chaque couche selon la norme NF P 18-423 et vibration à l'aide de la table vibrante à la fin du remplissage des moules, de manière à éliminer les vides d'air. Les éprouvettes sont arasées par la suite selon la norme française NF P 18-404.

Tab. III-5. *Caractéristiques physiques des bétons à l'état frais.*

	B30	B32	B35	B40
E/C	0.6	0.5	0.5	0.45
Affaissement au cône d'Abrams (cm)	16	7	6	22
Masse volumique apparente réelle (kg/m ³)	2387	2416	2428	2488
Air occlus (%)	1.9	1.5	1.6	1.3

À partir des résultats indiqués dans le **Tab. III-5**, on peut constater que plus le rapport E/C est faible (cf. **Tab. III-4**), plus la compacité du béton est importante, ceci peut être observé à partir des résultats de la masse volumique apparente des quatre bétons. Malgré que le béton B40 est formulé avec le plus faible rapport E/C , l'utilisation d'un adjuvant, plastifiant réducteur d'eau, dans la formulation de ce béton a permis d'avoir le plus important affaissement à l'état frais par rapport aux autres bétons étudiés. Nous constatons aussi, que le rapport E/C est une donnée influente sur la quantité d'air occlus dans le béton frais qui influe aussi sur la porosité du matériau durci.

III.3.2. Cure

Tous les bétons ont subi la même cure : après le coulage dans les moules et avant la prise, les éprouvettes sont protégées de la dessiccation par un film plastique cellophane et entreposées 24 heures dans une salle de conservation à une température de $20 \pm 2^\circ \text{C}$. Les éprouvettes sont démoulées le lendemain et immergées 28 jours dans l'eau à $20 \pm 2^\circ \text{C}$.

À l'issue de cette cure, d'autres caractéristiques sont mesurées :

- La masse volumique apparente de toutes les éprouvettes des différents bétons.
- La résistance mécanique en compression est déterminée selon la norme NF P 18-406. Cet essai est mené sur quatre éprouvettes (15 x 30) cm pour chaque composition du béton après rectification des éprouvettes selon la norme NF P 18-416.
- La porosité ouverte (connectée) globale du béton est aussi déterminée selon la méthode AFREM modifiée pour la mesure de la porosité accessible à l'eau (cf. § III.5). Les résultats sont consignés dans le **Tab. III-6**.

III.3.3. Préparation des échantillons

Dans les limites de tolérances dimensionnelles imposées par les cellules du perméamètre, une rectification des surfaces planes des échantillons du béton est nécessaire. Cette rectification des corps d'épreuve a été effectuée à l'aide d'une rectifieuse automatique pour obtenir une épaisseur de (50 ± 0.5) mm. Les profondeurs de passe des trois derniers usinages doivent être nulles de manière à obtenir les sections les plus planes possibles. Les deux extrémités de disque en béton ont été soumises à ce traitement (cf. **Fig. III-1**). Les hauteurs exactes de tous les échantillons de béton ont été vérifiées et mesurées à l'aide d'un pied à coulisse et enregistrées avec une précision de 0.1 mm (cf. **Fig. III-2**).

Les corps d'épreuve sont sciés à l'aide d'une tronçonneuse à béton. Le disque de béton d'une épaisseur de 5 cm, est pris de la partie médiane des éprouvettes : (15 x 30) cm et (11 x 22) cm afin d'obtenir des corps d'épreuve de différents diamètres ((15 x 5) cm et (11 x 5) cm). L'échantillon de 5 cm de diamètre a été obtenue par carottage appliqué sur la partie médiane des éprouvettes (15 x 30) cm (cf. **Fig. III-3**). Ce choix de la partie médiane est issu des résultats de mesures préliminaires de la porosité ouverte (accessible à l'eau), effectuées sur plusieurs échantillons découpés dans la même éprouvette. En effet, la variabilité des mesures de porosité indiquant une hétérogénéité des densités sur la hauteur des éprouvettes testées, nous a conduits à faire ce choix puisque la partie médiane représente la valeur moyenne de la porosité ouverte du matériau béton.

Lors de l'opération de sciage, la partie inférieure de l'échantillon proche de la face du fond du moule et la partie supérieure, proche de la face arasée, sont repérées afin de tester l'ensemble des disques, extraits des éprouvettes de différents bétons formulés en gardant le même sens pour le test de la perméabilité (sens du coulage lors de la confection).



Fig. III-1. Rectification des surfaces planes du disque en béton.



Fig. III-2. Mesure de la hauteur de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse.



Fig. III-3. Echantillons de béton de différentes tailles (5, 11 et 15 cm de diamètre).

III.4. Caractéristiques mécaniques du béton

À l'issue de la maturation dans l'eau à 28 jours, quatre éprouvettes (15 x 30) cm de chaque composition de béton ont été testées en compression à l'aide d'une presse hydraulique, selon la norme NF P 18-406 (1981) ou NF EN 12390-3 (2001). Les résultats illustrés en histogrammes sur la Fig. III-4 sont la moyenne des quatre échantillons écrasés.

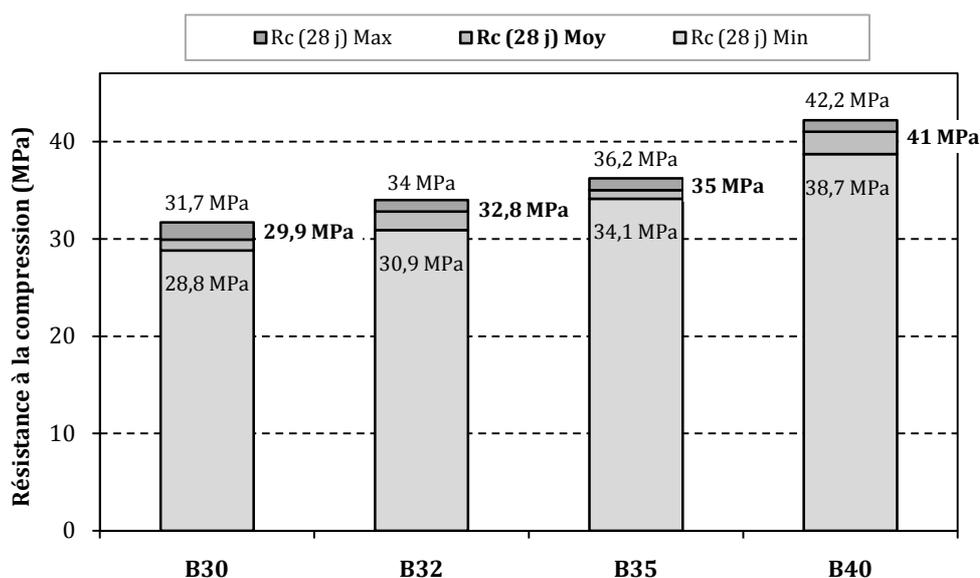


Fig. III-4. Résistance à la compression à 28 jours des bétons B30, B32, B35 et B40.

Les premiers résultats obtenus montrent que le béton B40 a une résistance à la compression (R_c) la plus élevée car il est formulé avec un dosage plus important de ciment (400 kg/m^3) et un rapport E/C le plus faible (égal à 0.45) ce qui induit une moindre porosité, ainsi que l'utilisation d'un sable combiné (sable concassé 0-4 (75 %) + sable fin 0-1 (25 %)), avec un module de finesse $M_f = 2.44$, peut améliorer sa granulométrie qui peut agir sur sa compacité et par conséquent participer à l'augmentation de sa résistance à la compression.

Les bétons B32 et B35 ont la même composition sauf que les ciments utilisés sont de classes de résistances différentes. Il est clair que la différence entre leurs résistances est due à la classe de résistance du ciment utilisé. En revanche, la différence des résistances des bétons

B30 et B35 est due aux rapports E/C différents. Ce résultat montre que le rapport E/C a une influence significative sur la résistance mécanique du béton ; plus le rapport E/C est faible et plus faible est sa porosité, ce qui rend le matériau plus compacte et donc plus résistant.

III.5. Mesure de la porosité accessible à l'eau

La porosité ouverte (accessible à l'eau) est un indicateur pertinent pour estimer la durabilité du béton. La porosité décrit l'espace total disponible pour le transport des gaz, des liquides et des ions.

Les différents échantillons utilisés pour cet essai sont des disques de béton de 5 cm de hauteur et de 15 cm de diamètre. Ces échantillons sont obtenus par sciage de la partie médiane des éprouvettes cylindriques (15 x 30) cm. Le protocole expérimental utilisé dans cette étude pour mesurer la porosité est le protocole modifié de l'AFPC-AFREM (cf. Fig. III-5)

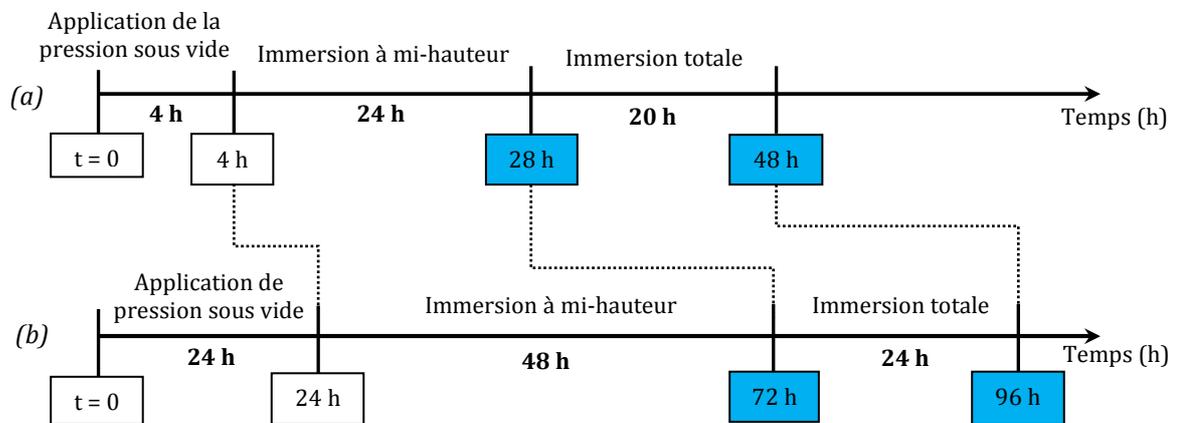


Fig. III-5. Protocole de saturation - (a) : procédure AFPC-AFREM (1997) [AFPC 97]
(b) : procédure AFPC-AFREM modifiée [BENF 09].

On obtient M_{sat}^{imm} en pesant l'échantillon, complètement saturé, immergé dans l'eau à l'aide d'une balance hydrostatique. La masse de l'échantillon saturé, sorti de l'eau dont on essuie, à l'aide d'un chiffon sec, l'excès d'eau (pour ne pas vider l'eau des pores), M_{sat} est pesée immédiatement. Enfin, M_{sec} est la masse sèche du corps d'épreuve déterminée par pesée obtenue après un passage prolongé à l'étuve pour le séchage.



Fig. III-6. Dispositif de saturation.

Pour obtenir cette masse sèche de l'échantillon, nous avons choisi de le sécher à une température de 80° C pendant environ 4 semaines. La masse sèche de l'échantillon est obtenue lorsque la perte de masse relative pendant 24 heures ne dépasse pas 0,05 %. La porosité accessible à l'eau (Φ_{eau}) exprimée en pourcentage volumique est obtenue par la relation suivante (Eq. (III-1)) :

$$\Phi_{eau} = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{M_{sat} - M_{sat}^{imm}} \cdot \rho_{eau} \cdot 100 \quad (III - 1)$$

Les valeurs indiquées sur le tableau **Tab. III-6**, sont la moyenne de trois éprouvettes. Les résultats présentés sur ce tableau correspondent à la porosité accessible à l'eau et aux caractéristiques mécaniques de chaque béton étudié.

Tab. III-6. *Caractéristiques des bétons à l'état durci.*

	B30	B32	B35	B40
Résistance à la compression, R_c (MPa)	29.9	32.8	35	41
Masse volumique apparente à 28 j (kg/m ³)	2442	2461	2471	2502
Porosité accessible à l'eau (%)	15.2	14.7	13.9	12.7

Les résultats montrent que la résistance à la compression du béton augmente quand sa porosité diminue. Cette diminution est due principalement à la diminution du rapport E/C , ce qui traduit une élévation de la compacité du matériau et donc de sa masse volumique apparente.

III.6. Porosimétrie par intrusion de mercure (PIM)

Dans cette étude, la porosité totale (Φ_{Hg}) et la distribution des tailles de pores des bétons ordinaires étudiés ont été estimées par des mesures de la porosimétrie par intrusion du mercure (PIM).

La PIM constitue l'un des principaux outils d'investigation de la structure aux différentes échelles (micro, méso et macro) des matériaux cimentaires ou de leurs constituants (par exemple les granulats) [BARO 02b]. Elle permet d'accéder à la porosité totale de l'échantillon (cf. **Annexe F**) étudié ainsi qu'à la distribution des tailles des pores des matériaux. Cette technique simple et rapide permet donc de caractériser le réseau des pores interconnectés d'un matériau, dont les espaces intergranulaires, ou les pores (ouverts), sont compris dans le domaine de mesure de l'appareil allant généralement de quelques nanomètres à quelques dizaines de micromètres.

La méthode repose sur la propriété du mercure (liquide non mouillant) à ne pénétrer dans un capillaire que sous l'effet d'une pression. Il s'agit de mettre le matériau à étudier sous vide en présence de mercure. L'essai consiste à appliquer une pression de mercure P_{Hg} que l'on augmente de façon incrémentale, ce qui permet de faire pénétrer le mercure dans des pores de plus en plus petits. On mesure alors le volume cumulé du mercure (égal au volume poreux) entrant dans les pores à chaque incrément. L'équation de Washburn [WASH 21] donne la relation entre le diamètre moyen D_p du capillaire pénétré par le liquide et la pression du mercure P_{Hg} :

$$P_{Hg} = - \frac{4 \sigma_{Hg} \cdot \cos\theta}{D_p} \quad (III - 2)$$

Où σ_{Hg} est la tension superficielle du mercure et θ l'angle de contact entre le mercure et la paroi du pore.

On obtient donc, la courbe d'intrusion du mercure qui représente le volume cumulé du mercure introduit en fonction du diamètre des pores directement accessibles. La dérivée de cette courbe permet de déterminer les principales familles des pores (volume poreux) en fonction de leurs diamètres, plus communément appelée distribution de la taille des pores. Ces mesures ont été réalisées au laboratoire GeM (IUT de St-Nazaire) à l'aide d'un porosimètre automatique (model: Micrometritics–AutoPoreIV). Les essais ont été conduits en utilisant une pression initiale d'intrusion de mercure égale à 3,5 kPa. La pression a ensuite été augmentée à 70 Pa jusqu'à une pression maximale d'environ 413,68 MPa de sorte que le diamètre des pores D_p varie de 6 nm à 358 μm . La durée moyenne pour obtenir une pression complète lors d'un essai de porométrie est d'environ une heure et demie. Pour les bétons étudiés, nous avons considéré dans les calculs l'angle de contact θ égal à 130° et la tension superficielle du mercure σ_{Hg} égale à 0.485 N/m (cf. **Annexe F**). Il est à noter que la porométrie au mercure ne donne pas une cartographie du réseau poreux, mais le diamètre des canaux d'accès aux pores.

III.7. Mesure de la perméabilité au gaz

III.7.1. Dispositif de mesure de la perméabilité au gaz

La perméabilité au gaz du béton a été mesurée au laboratoire GeM (IUT de St-Nazaire) à l'aide d'un perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU [KOLL 89]. Il s'agit d'une méthode de laboratoire applicable aux éprouvettes moulées ou carottées, dans les limites des tolérances dimensionnelles imposées par les cellules de mesure de l'appareil.

L'essai consiste à soumettre un échantillon de béton, protégé latéralement et confiné, à une pression constante de gaz (ici de l'Azote (N_2)) et à mesurer le flux du gaz traversant l'échantillon en régime permanent. Il est alors possible de calculer la perméabilité apparente, qui dépend de la surpression appliquée (cf. **Annexe B**). Une vue générale du perméamètre CEMBUREAU est présentée sur la **Fig. III-7**.



Fig. III-7. Vue générale de perméamètre CEMBUREAU (IUT St-Nazaire).



Fig. III-8. Débitmètre massique du gaz (Capacité : 2 l/minute).

La pression relative ($P_{inj} - P_{atm}$) appliquée à l'échantillon de béton est mesurée avec un manomètre digital de 1 hPa de précision. Notons que les débitmètres à bulles, installés

initialement sur le perméamètre CEMBUREAU, pour la mesure du débit volumique ont été remplacés par des débitmètres massiques de haute précision (cf. **Fig. III-8**) placés en amont et en aval de l'échantillon (de la cellule) pour des résultats plus précis du débit massique mesuré une fois le régime permanent atteint (cf. **Annexe B**). Les mesures de perméabilité ont lieu en salle climatisée à $20 \pm 1^\circ \text{C}$ et $50 \pm 5 \% h_r$. Un schéma de principe du perméamètre CEMBUREAU utilisé au laboratoire GeM (Université de Nantes) est donné en **Fig. III-9**.

L'essai est réalisé pour plusieurs valeurs de surpression. À partir des valeurs des perméabilités apparentes, il est possible de déterminer la perméabilité intrinsèque du matériau. Pour chaque pression différentielle, la perméabilité apparente K_{app} (m^2) est calculée à partir de l'Eq. (III-3), selon les conditions considérées :

$$K_{app} = \frac{2 \mu \cdot Q \cdot L \cdot P_{atm}}{A (P_{inj}^2 - P_{atm}^2)} \quad (\text{III} - 3)$$

Selon l'Eq. (III-3) la valeur de la perméabilité apparente dépend de la pression atmosphérique. Celle-ci est mesurée avec un baromètre de Torricelli à une précision de $\pm 1 \text{ hPa}$.

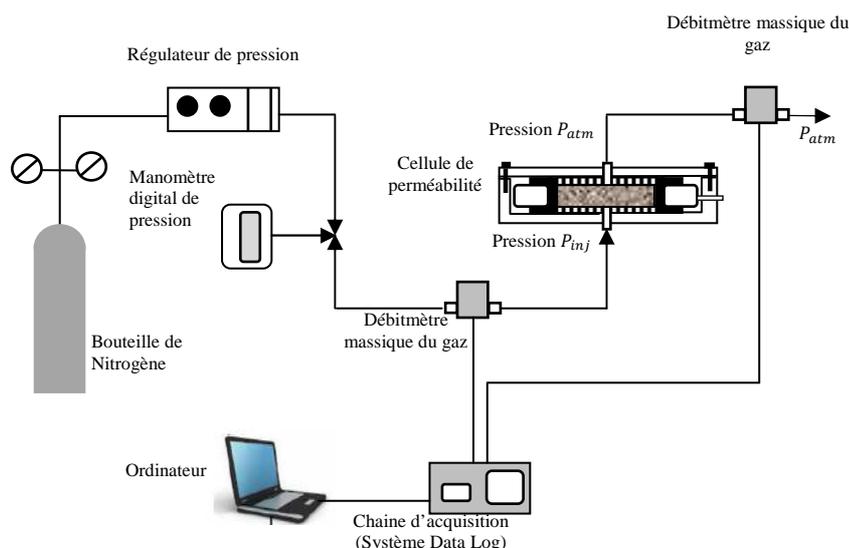


Fig. III-9. Schéma de Principe du perméamètre CEMBUREAU utilisé au laboratoire GeM, France.

III.7.2. Protocole de mesure de la perméabilité au gaz

La procédure d'essai suit celle recommandée par l'AFPC-AFREM [AFPC 97]. Néanmoins, l'essai présenté ici en diffère par le préconditionnement, car l'état hydrique du matériau est un paramètre principal de l'étude. Alors, après un préconditionnement bien déterminé (cf. § III.9), le corps d'épreuve en béton est d'abord placé dans le porte échantillon (manchon en polyuréthane), puis placé dans une cellule appropriée de type CEMBUREAU. Ces deux faces planes reposent sur une plaque striée permettant une répartition homogène de la pression du gaz (cf. **Fig. III-10**). Après la fermeture de la cellule, une chambre à air torique, gonflée avec une pression minimale de confinement de 5 bars, comprime le manchon (le porte échantillon) et assure ainsi l'étanchéité latérale. Cette pression appliquée sur la surface

latérale du corps d'épreuve en béton doit être supérieure à la pression verticale du gaz (3 bars) appliquée sur sa surface plane pour assurer l'uni-direction du gaz percolant l'échantillon. Le tuyau d'admission de l'azote est connecté à la cellule, puis l'acquisition du débit et de la pression est lancée et la pression est réglée à 3.0 bars.

Dans cette étude expérimentale, la perméabilité apparente est mesurée sous des gradients de pression compris entre 1 et 3 bars, par palier de 0.5 bar, en régime permanent d'écoulement unidirectionnel du gaz. Chaque échantillon de béton a été testé à cinq pressions d'injection différentes : 1, 1.5, 2, 2.5 et 3 bars, de manière à obtenir une précision de mesure satisfaisante.



Fig. III-10. *Emplacement de l'échantillon de béton dans la cellule de perméabilité CEMBUREAU.*

Avant que les premières mesures de débit du gaz ne soient effectuées, la pression doit être appliquée pendant un temps suffisamment long afin que l'écoulement de gaz puisse s'établir en régime permanent à travers l'échantillon du béton. Généralement un temps de 30 minutes suffit pour que l'écoulement soit stable et établi [KOLL 89]. Mais cela est recommandé pour un béton complètement sec (séchage total à 80 et à 105° C selon le mode opératoire AFPC-AFREM [AFPC 97]).

Dans le cadre de cette étude, l'état hydrique du matériau est un paramètre de l'étude et les perméabilités apparente et intrinsèque sont mesurées en fonction du degré de saturation du béton qui est partiellement saturé. Alors, un temps minimum d'environ 1 heure est prévu avant de procéder aux mesures de débit car le débit gazeux est très faible dans le cas d'un échantillon de béton dont la teneur en eau est proche de la saturation. Cette condition de stabilisation du flux à travers le corps d'épreuve en vue de mesurer la perméabilité au gaz du béton en régime permanent est vérifiée en prenant deux mesures séparées dans un intervalle de 10 minutes. Si les deux valeurs de débit, mesurées durant cette période, diffèrent de moins de 2 %, le régime permanent est atteint et la mesure peut être enregistrée. Si non, un temps supplémentaire de 15 minutes au minimum est attendu de nouveau avant que la mesure de débit ne soit effectuée pour la même pression d'injection.

L'efficacité de l'étanchéité latérale des cellules a été vérifiée pour une pression d'injection de 3 bars. Les tests réalisés avec des disques massifs usinés dans le PVC, de mêmes dimensions que les échantillons testés dans cette étude, n'ont permis la détection d'aucun débit dans le cas d'une pression de confinement (appliquée sur la surface latérale) de 5 bars. Alors, on peut avancer que le contact entre le manchon en polyuréthane souple et les surfaces circulaires des disques est parfait.

III.8. Mesure de la perméabilité à l'eau

III.8.1. Dispositif de mesure de la perméabilité à l'eau

Dans le cas des bétons perméables et très perméables, la perméabilité à l'eau liquide peut facilement être évaluée par la mesure directe du test de perméabilité à l'eau sous pression (en conditions laminaires d'écoulement (cf. § II.2.2.4)). Dans la littérature, différents dispositifs expérimentaux existent, mais à ce jour, aucun mode opératoire recommandé n'a été publié par l'ensemble de la communauté scientifique.

Pour un matériau saturé par le fluide de mouillage, on impose une différence de pression entre les deux faces de l'échantillon et on mesure le débit de fluide passant à travers l'échantillon pendant un temps donné. Il s'agit de déterminer le coefficient de perméabilité K à l'aide d'un perméamètre. Selon la loi de Darcy (cf. Eq. (III-4)), le débit liquide dans les matériaux poreux est proportionnel au gradient de pression P_l [HAPP 86].

$$v_l = -\frac{K_l}{\mu_l} \cdot \vec{\nabla} P_l \quad (\text{III} - 4)$$

Où v_l est le débit volumique (m^3/s), K_l est la perméabilité « intrinsèque » à l'eau liquide de la matière saturée (indépendante du degré de saturation en eau liquide (S_l) et théoriquement indépendante du fluide pénétrant) (m^2), μ_l est la viscosité dynamique de l'eau liquide (fluide incompressible) ($\mu_l = 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ à 20° C) et P_l est la pression du liquide (Pa).

La perméabilité à l'eau liquide $K_l \cdot k_{rl}(S_l)$ d'un milieu non saturé (béton partiellement saturé) régit le transport (convectif) de l'eau liquide conformément à la loi étendue de Darcy qui caractérise l'écoulement visqueux d'un fluide incompressible et non réactif sous un gradient de pression totale et qui s'écrit dans un système unidimensionnel, selon l'axe Ox (cf. Eq. (III-5)) [BARO 07c].

$$v_l = -\frac{K_l}{\mu_l} \cdot k_{rl}(S_l) \cdot \frac{\partial P_l}{\partial x} \quad (\text{III} - 5)$$

Où $K_{rl}(S_l)$ est la perméabilité relative à l'eau liquide qui dépend du degré de saturation (S_l).

Par contre, il est largement reconnu que dans le cas des bétons faiblement perméables (béton ordinaire de bonne qualité et le béton à haute et très haute performance), la mesure directe de la perméabilité à l'eau liquide avec un perméamètre courant (mesure du débit de l'eau sous gradient de pression par un dispositif conventionnel) est délicate et difficile voire impossible [PERR 92b], [BARO 04a]. Pour un ordre de grandeur de 10^{-21} m^2 de la perméabilité, une épaisseur de l'échantillon de l'ordre 5 cm et un état de saturation complet, la loi de Darcy prévoit une vitesse de filtration d'environ 10^{-9} m/s (environ 1 cm/an) [COUS 01], ce qui rend le test difficile à réaliser. Par conséquent, si l'on souhaite mesurer la perméabilité à l'eau liquide du béton de faible perméabilité de manière purement expérimentale (mesure du débit de l'eau sous gradient de pression à travers le béton), il est nécessaire d'adapter le dispositif expérimental et éventuellement la méthode d'essai. Des techniques spécifiques, utilisant des appareils sophistiqués, ont été développées pour mesurer la perméabilité à l'eau liquide du béton. Un exemple est l'utilisation d'une cellule triaxiale, associée à un système de mesure suffisamment précis, pour mesurer les valeurs de perméabilité à l'eau liquide de l'ordre de $E-22 \text{ m}^2$ [EL-DI 95].

On notera par ailleurs, qu'il existe des procédés basés sur un test de pénétration de l'eau sous pression dans un régime non stationnaire. Par exemple, la méthode exposée dans la norme DIN EN 12390-8 [EN 12390-8] où l'échantillon n'est pas pré-saturé, permet de quantifier la profondeur de pénétration d'eau (cf. Fig. III-11). Cette méthode peut alors quantifier le transport de l'eau sous un gradient de pression et éventuellement accéder à la perméabilité du matériau (en régime non-stationnaire). En effet, selon la norme DIN EN 12390-8, une pression d'eau de 1 bar est appliquée sur une seule face plane d'un échantillon cylindrique ou cubique (d'épaisseur 1) pendant les premières 24 h (premier jour), suivie par l'application de 3 bars de pression pendant 48 h (les deux jours qui suivent) et à la fin une pression d'eau de 6 bars est appliquée sur l'échantillon pendant 24 h (quatrième jour). A la fin de l'essai, un fendage de l'échantillon est effectué à l'aide d'une presse hydraulique (cf. Fig. III-12), puis on mesure la pénétration de l'eau à l'aide d'une règle millimétrique.



Fig. III-11. Essai de pénétration de l'eau dans le béton (Laboratoire EOLE).



Fig. III-12. Fendage d'une éprouvette du béton (Laboratoire EOLE).

Dans le cadre de ce travail de recherche, la perméabilité à l'eau du béton a été mesurée au laboratoire EOLE à l'aide d'un perméamètre à eau (à trois têtes) (cf. Fig. III-13). Cet appareil est destiné à l'origine pour la mesure de la pénétration de l'eau dans le béton comme nous l'avons décrit plus haut.



Fig. III-13. Perméamètre à l'eau (Laboratoire EOLE).

Nous rappelons que notre matériau, objet de cette étude, est partiellement saturé. Alors, pour un essai de perméabilité à l'eau, l'application de la pression d'eau pendant 4 jours selon la méthode de la norme DIN EN 12390-8, représente un inconvénient majeur car l'échantillon testé sera complètement saturé à partir du premier jour de l'essai (re-saturation du béton). À cet effet, nous avons apporté quelques modifications à cette méthode. Tout d'abord, la pression de l'eau appliquée a été réduite de 6 à 3 bars ainsi que la hauteur des corps d'épreuve testés a été réduite aussi de 15 à 5 cm, dans le but d'étudier la perméabilité à l'eau du béton dans des conditions comparables à celles de l'essai de la perméabilité au gaz. De plus, le temps de l'essai de quelques jours, effectué en régime non stationnaire, a été réduit à quelques heures dont la mesure du débit est effectuée à l'aide des tubes manomètres après une stabilisation du flux traversant l'échantillon de béton.

La Fig. III-13 montre une vue générale du dispositif expérimental utilisé, sur lequel trois échantillons (11 x 5) cm sont installés pour la mesure de la perméabilité à l'eau sous pression de 3 bars. Un schéma de principe de ce perméamètre est présenté sur la Fig. III-14.

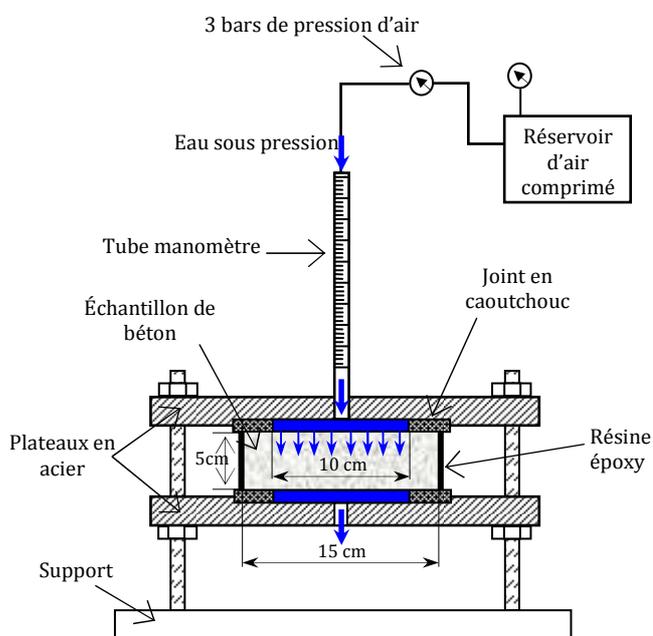


Fig. III-14. Schéma de Principe de perméamètre à eau utilisé au laboratoire EOLE.

III.8.2. Protocole de mesure de la perméabilité à l'eau

La perméabilité à l'eau du béton a été mesurée à l'aide d'un perméamètre à l'eau équipé avec un compresseur pour l'alimentation en air comprimé et des tubes manomètres pour la mesure des débits d'eau (cf. Fig. III-13). Il s'agit d'une méthode applicable sur des échantillons moulés ou carottés, dans les limites de tolérances dimensionnelles imposées principalement par les plateaux en acier de l'appareil pour la fixation des échantillons et les joints en caoutchouc dur pour assurer l'étanchéité et empêcher les fuites d'eau sous pression. Les échantillons peuvent donc être avec une dimension maximale, en hauteur ou en diamètre, de 16 cm.

L'essai consiste à soumettre un échantillon de béton, protégé latéralement (recouvert avec deux couches de résine époxy) pour assurer un écoulement unidirectionnel, à une pression

constante de l'eau et mesurer le débit volumique infiltrant l'échantillon. Après un préconditionnement appliqué (séchage et refroidissement (cf. § III.9) et après avoir purgé tout l'air contenu dans le circuit d'eau, l'échantillon de 5 cm de hauteur est placé entre les supports (les plateaux en acier) du perméamètre, comme il est illustré sur la Fig. III-14. Des joints en caoutchouc de forme circulaire et de 15 mm d'épaisseur sont également placés sur les faces supérieure et inférieure de l'échantillon, dont la zone de contact entre l'échantillon et l'eau sous pression est de 100 mm de diamètre (rayon intérieur du joint). Il est alors possible de calculer la perméabilité à partir d'un flux d'eau stable mesuré, après un temps t , qui dépend de la pression appliquée.

Dans la présente étude, les bétons ordinaires étudiés sont partiellement saturés ; il est donc nécessaire d'effectuer des essais rapides de perméabilité (en quelques heures) afin d'éviter une re-saturation du corps d'épreuve avant d'effectuer la mesure de débit. Pour accélérer l'écoulement d'eau, des pressions de l'ordre de quelques MPa peuvent être utilisées ; mais une forte pression peut augmenter le risque de fuite qui provoque une surestimation de K_l [SCHE 07]. Ainsi, nous avons proposés d'appliquer une pression similaire à celle appliquée à l'essai de la perméabilité au gaz.

À partir des tests préliminaires, nous avons proposés de mesurer le débit de l'eau après l'application d'une pression d'eau constante de 3 bars sur l'échantillon pendant 6 heures. La Fig. III-15 montre une pénétration de l'eau d'environ 4 cm de profondeur qui a été mesurée sur un échantillon du béton B35 après une application d'une pression d'eau de 3 bars pendant seulement 4 heures (une moyenne d'environ un centimètre par heure). Nous pensons, donc, qu'une durée de 6 h est suffisante pour une pénétration de l'eau dans les 5 cm d'épaisseur des échantillons de béton testés sous un gradient de pression constant de 3 bars.



Fig. III-15. Profondeur de pénétration de l'eau à travers un échantillon (15 x 5) cm du béton B35.

Il est important de noter qu'après chaque heure de l'essai, le débit de l'eau a été mesuré à l'aide d'un tube manomètre. Les mesures des masses de l'échantillon avant et après l'essai (différence de pesées) ont permis la vérification du débit mesuré par le tube manomètre. Nous rappelons aussi que nous avons repéré le sens des échantillons testés lors de l'opération de sciage. Banthia et Mindess [BANT 89] ont montré que l'inversement de sens d'écoulement d'eau à travers l'échantillon peut opposer le phénomène de colmatage et de blocage des pores et donc aboutir à des valeurs beaucoup plus élevées de perméabilité. Comme dans le cas de l'essai de la perméabilité au gaz, le sens vertical de l'écoulement de

l'eau à travers l'échantillon est le sens du coulage du béton dans les moules lors de la confection des éprouvettes de béton.

Les mesures du flux de l'eau ont été prises toutes les heures jusqu'à ce qu'un régime d'écoulement stationnaire de l'eau dans le disque soit atteint. Pour nos bétons ordinaires étudiés, il a fallu environ 4 h d'écoulement pour avoir un débit stable. Les quantités d'eau liquide qui se sont écoulées chaque heure à travers le disque en béton, ont été mesurées par la lecture de la diminution du niveau d'eau sur des tubes manomètres. Les résultats sont tracés sur un graphique, comme le cumul des quantités des débits d'eau en fonction de la durée cumulée pour déterminer le débit à l'état stable. La valeur moyenne des débits mesurés pendant les six heures a été utilisée pour déterminer le coefficient de perméabilité à l'eau K_l en appliquant la loi de Darcy. K_l est déterminée en utilisant l'Eq. (III-6) dont un exemple de calcul est présenté sur l'Annexe D :

$$K_l = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta h} \quad (\text{III} - 6)$$

Où K_l est le coefficient de perméabilité à l'eau (m/s); Q est le débit de l'eau qui s'écoule du côté amont de l'échantillon (m^3/s); L est l'épaisseur de l'échantillon du béton (m); A est l'aire de perméabilité (surface de contact de l'eau avec l'échantillon) (m^2) et Δh est la charge de pression (pression de l'eau exprimée en termes d'une hauteur h de la colonne d'eau) (m). En tenant compte de la viscosité dynamique de l'eau, $\mu = 10^{-3}$ Pa.s. La valeur de K_l peut être convertie en m^2 ($K = 1 \text{ m/s} = 10^{-7} \text{ m}^2$ (cf. § II.2.2.2)).

En effet, contrairement au gaz, différentes forces physiques agissent entre les molécules d'eau liquide et la matrice cimentaire. Ce sont des forces à courte portée qui réduisent considérablement la vitesse des molécules d'eau à proximité des parois à l'intérieur des pores où l'écoulement a eu lieu [COUS 01]. Cet effet peut alors être traité avec une perméabilité effective à l'eau liquide K_l ; une valeur qui est sensiblement inférieure à la perméabilité intrinsèque au gaz obtenue par des mesures directes et réalisée en utilisant le gaz comme fluide percolant. La perméabilité intrinsèque à l'eau d'un béton typique de structure réside dans la gamme de 10^{-19} à 10^{-17} m^2 [CON.So. 85]; tandis que les valeurs de la perméabilité au gaz ont été trouvées avec un ou deux ordres de grandeur plus élevées [BAMF 87].

III.9. Le préconditionnement

La procédure de séchage, appelée aussi le préconditionnement, est une procédure nécessaire et inévitable afin de pouvoir mesurer la perméabilité au gaz des matériaux cimentaires [SUGI 96]. Dans la littérature, quelques procédures de séchage comme les recommandations AFPC-AFREM [AFPC 97], consistent à effectuer un séchage dans une étuve à 80°C pendant 28 jours, suivi par un séchage à 105°C jusqu'à une stabilisation de la masse avant d'entamer l'essai de la perméabilité au gaz [CHOI 07], [BARO 07c], [BANT 07]. Cette procédure est rapide et très facile à effectuer; mais elle modifie la structure poreuse du matériau [VAN-G 80], [MUAL 76] et peut provoquer des microfissures à cause d'un retrait dû au séchage, ce qui augmente la perméabilité du béton.

Dans le cadre de cette thèse, l'état hydrique des bétons est un paramètre principal de l'étude et les perméabilités à l'eau et au gaz du béton sont mesurées en fonction de son degré de

saturation. À ce titre, nous présentons dans ce qui suit la procédure expérimentale que nous avons suivie.

Après la rectification des surfaces planes des échantillons des quatre bétons (B30, B32, B35 et B40) et de différentes tailles ((15 x 5) cm, (11 x 5) cm et (5 x 5) cm), les surfaces latérales des corps d'épreuve, consacrés pour la mesure des perméabilités au gaz, (trois échantillons pour chaque diamètre et pour chaque béton ordinaire) sont recouvertes d'un ruban d'aluminium autocollant afin que les transferts gazeux, pendant le séchage dans l'étuve et lors de l'essai de perméabilité, ne se produisent que par les deux faces planes. L'ensemble de ces corps d'épreuve sont placés dans une étuve ventilée régulée à $60 \pm 1^\circ \text{C}$, et séchés par palier puis conservés afin d'obtenir différents taux de saturation. La durée de chaque palier équivaut à 24 h de séchage, suivies de 24 h de refroidissement dans un dessiccateur à $20 \pm 2^\circ \text{C}$ pour atteindre une stabilisation thermique avant d'entamer l'essai de perméabilité. Une dernière pesée est effectuée à la sortie du dessiccateur, avant l'essai, pour s'assurer de la stabilité de la masse. Après chaque échéance de séchage, des mesures de pertes de masse sont alors effectuées et les degrés de saturation des échantillons peuvent être ainsi déterminés.

Dans le but d'étudier l'influence du mode de séchage sur l'évolution de la perméabilité au gaz du béton, un séchage à $80 \pm 1^\circ \text{C}$ a été appliqué par palier sur une deuxième série d'échantillons du béton ordinaire B35 dont la durée de chaque palier équivaut à 48 h de séchage, suivies de 24 h de refroidissement dans un dessiccateur à $20 \pm 2^\circ \text{C}$. Cette deuxième série est composée de neuf corps d'épreuve (trois échantillons de chaque diamètre), ce qui permettra aussi d'évaluer en parallèle l'influence de la taille de l'échantillon sur la mesure de la perméabilité au gaz du béton.

Pour les essais de la perméabilité à l'eau, quatre séries d'échantillons correspondant aux quatre BO étudiés (B30, B32, B35 et B40) ont été testées, dont chacune se compose de vingt échantillons de taille (15 x 5) cm (deux échantillons au minimum ont été testés par essai, pour chaque degré de saturation). De plus, une cinquième série d'échantillons du béton B35 de taille différente (11 x 5) cm a été aussi testée dans le but d'évaluer l'influence du diamètre du corps d'épreuve sur le débit d'eau traversant l'échantillon et donc sur la mesure de la perméabilité à l'eau du béton.

Il est clair que le nombre des échantillons utilisés pour la mesure de la perméabilité à l'eau est beaucoup plus important que ceux testés pour la mesure de la perméabilité au gaz, car il est impossible pour cet essai d'appliquer des échéances de séchage sur trois échantillons seulement comme dans le cas de l'essai au gaz (séchage du béton par palier). Effectivement, à la fin de l'essai de perméabilité à l'eau, le degré de saturation de l'échantillon testé change (le béton est re-saturé à nouveau). Il est donc impossible de le réutiliser à cause des réactions chimiques qui se produisent entre l'eau et la matrice cimentaire et la modification du réseau poreux qui s'en suit. Alors, pour ces cinq séries d'échantillons, chaque corps d'épreuve a un degré de saturation ($0 \leq S_l \leq 1$) différent des autres et ne peut donc être testé qu'une seule fois. Cette variation est le résultat de durées de séchage différentes dans une étuve régulée à $60 \pm 1^\circ \text{C}$.

Nous rappelons que dans cette étude, le degré de saturation du béton a été évalué par différence de pesée. Les masses des échantillons dans leurs différents états hydriques (sec, saturé et partiellement saturé) ont été pesées à l'aide d'une balance dont la précision est de

0.02 g. Il est important de noter aussi, que tous les échantillons utilisés pour l'essai de la perméabilité à l'eau ont été recouverts avec deux couches de résine époxy pour assurer un écoulement unidirectionnel de l'eau et éviter toute fuite d'eau qui peut se produire lors de l'essai. Nous précisons que les échantillons à tester sont refroidi dans un dessiccateur à $20 \pm 2^\circ \text{C}$ pendant 24 h pour une stabilisation thermique avant la mesure de la perméabilité à l'eau.

Ce protocole de préconditionnement a été choisi, d'une part, pour limiter les risques de fissuration du béton dus à de forts gradients de température, et d'autre part, pour obtenir des teneurs en eau les plus homogènes possibles à l'intérieur des échantillons testés.

Etant donné la taille importante des corps d'épreuve ((15 x 5) cm) et pour se rapprocher de l'état complètement sec du béton, la durée de séchage a été prolongée à deux mois jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives ne dépassent pas 0.05 % (mode opératoire AFPC-AFREM). La saturation complète des échantillons du béton a été effectuée sous vide en utilisant un dessiccateur et une pompe à vide suivant les recommandations AFPC-AFREM modifiées (cf. Fig. III-5).

L'application du séchage par palier, après des mesures successives de perméabilité, nous a poussée, par mesure de précaution, à vérifier la microfissuration du matériau. Ceci a été réalisé à l'aide d'un Microscope électronique à balayage (environ 300 fois) sur le site de l'IUT de St-Nazaire. L'exemple donné sur la Fig. III-16 correspond à une surface analysée du béton B35 à 1 mm de profondeur par rapport à la surface chauffée. Aucune microfissure n'a pu être observée à cette profondeur. Donc, suite à une procédure de séchage à 60°C , les microfissures ne pourront être que très superficielles, et l'ensemble des échantillons testés sont donc considérés identiques avant et après cette procédure de séchage. La possibilité de développement des fissures est minime due au fait que ces échantillons ne sont soumis à aucun gradient hydrique ou thermique important (brusque) pendant tous les essais.

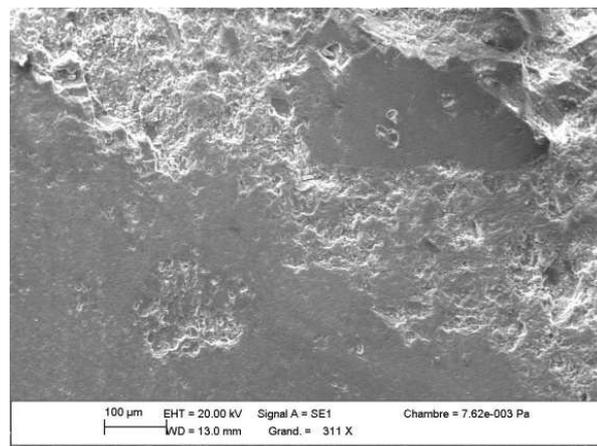


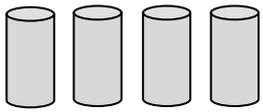
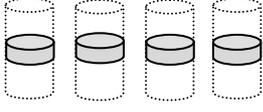
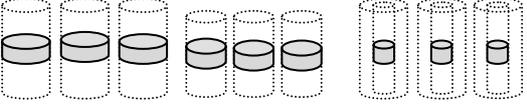
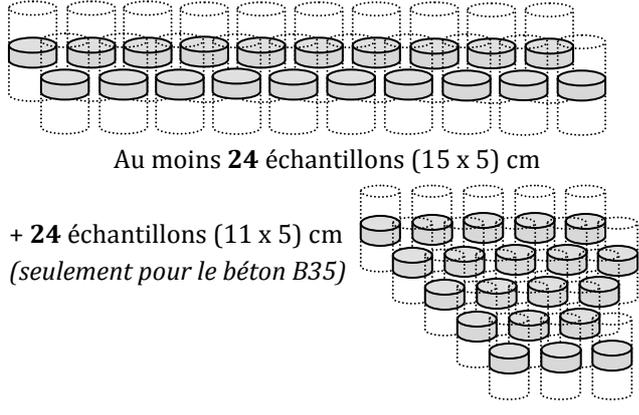
Fig. III-16. MEB du B35 après un séchage à 60°C (x 311).

III.10. Plan expérimental

Pour chacun des quatre bétons étudiés B30, B32, B35 et B40, plus de 38 éprouvettes (15 x 30) cm et 3 éprouvettes (11 x 22) cm ont été confectionnées. De plus, pour le béton B35, 3 éprouvettes de plus de la taille (15 x 30) cm ont été préparées pour étudier l'influence de

la température du séchage sur la perméabilité du béton, ainsi que 24 éprouvettes de béton (11 x 22) cm ont été confectionnées dans le but d'étudier l'influence du diamètre de l'échantillon sur la mesure de la perméabilité à l'eau du béton. La répartition des éprouvettes par type d'essai est exposée sur le **Tab. III-7**.

Tab. III-7. Nombre d'éprouvettes utilisés dans l'élaboration du programme expérimental.

Type de Mesures	Nombre d'éprouvettes confectionnées pour chaque béton étudié	Total des éprouvettes confectionnées
Résistance à la compression	 4 éprouvettes (15 x 30) cm	16 éprouvettes (15 x 30) cm
Porosité à l'eau + Porosité au mercure	 4 échantillons (15 x 5) cm dont 3 pour la porosité à l'eau et 1 pour la porosité au mercure (le prélèvement des échantillons pour la porosité au mercure se fait toujours dans la partie médiane)	16 éprouvettes (15 x 30) cm
Perméabilité au gaz	 3 échantillons (15 x 5) cm + 3 éch. chauffés à 80° C 3 échantillons (11 x 5) cm 3 échantillons (5 x 5) cm	27 éprouvettes (15 x 30) cm + 12 éprouvettes (11 x 22) cm
Perméabilité à l'eau	 Au moins 24 échantillons (15 x 5) cm + 24 échantillons (11 x 5) cm (seulement pour le béton B35)	Plus de 96 éprouvettes (15 x 30) cm + 24 éprouvettes (11 x 22) cm

Remarque : Le nombre d'éprouvettes confectionnées dépasse largement le nombre indiqué dans le **Tab. III-7**. Un nombre important d'éprouvettes a été utilisé pour des essais préliminaires de la mesure de la perméabilité à l'eau utilisant différentes méthodes, telle que la méthode de Valenta [VALE 70] décrite dans le chapitre IV.

Chapitre IV. Mesure de la perméabilité relative au gaz.

Sommaire

IV.1. Introduction.....	103
IV.2. Résultats des essais de perméabilité apparente au gaz.....	104
IV.2.1. Perméabilité au gaz à l'état sec.....	104
IV.2.2. Influence du degré de saturation sur la perméabilité apparente.....	105
IV.3. Évolution de la perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation.....	110
IV.4. Évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation.	112
IV.5. Influence du préconditionnement des échantillons sur la perméabilité au gaz.....	113
IV.6. Influence du rapport E/C sur les propriétés de transfert du béton.....	116
IV.6.1. Influence du rapport E/C sur la perméabilité intrinsèque du béton...	116
IV.6.2. Influence du rapport E/C sur la microstructure du béton.....	118
IV.6.3. Influence du rapport E/C sur la perméabilité relative au gaz.....	120
IV.6.4. Influence du rapport E/C sur l'évolution de la constante de Klinkenberg β	121
IV.6.5. Influence du rapport E/C sur la proportion de l'écoulement moléculaire pendant l'essai de perméabilité au gaz.....	122
IV.7. Influence de la classe de résistance du ciment sur la perméabilité au gaz du béton.....	123
IV.8. Influence de la taille de l'échantillon sur la perméabilité au gaz du béton.....	125
IV.8.1. Influence de la taille de l'échantillon sur l'évolution de K_{int} en fonction de S_l	125
IV.8.2. Influence de la taille de l'échantillon sur la constante de Klinkenberg β	127
IV.8.3. Influence de la taille de l'échantillon sur la perméabilité relative au gaz.....	127
IV.8.4. Effet de la taille sur les mesures de K_{int} des bétons B30, B32 et B40.	128
IV.9. Variation de la perte en masse en fonction de la perméabilité relative.....	129
IV.10. Conclusions.....	132

Chapitre IV. Mesure de la perméabilité relative au gaz.

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente la mesure de la perméabilité relative au gaz (K_{rg}) des quatre bétons ordinaires étudiés, dans lequel on rapporte l'ensemble des résultats expérimentaux recueillis. On s'est focalisé sur l'évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction du taux de saturation en eau du matériau béton. Pour cela, des mesures de la perméabilité apparente (K_{app}) et de l'état de saturation du béton sont effectuées. La validation de la méthode suivie (approche de Klinkenberg) pour la détermination de la perméabilité intrinsèque (K_{int}) est vérifiée pour les matériaux étudiés.

De plus, les résultats de l'étude de la porométrie des bétons, déterminée par intrusion de mercure, sont exposés. Les résultats de K_{int} du béton ainsi que l'influence de la saturation en eau et la taille des échantillons, les différentes températures de séchage et aussi quelques paramètres de formulation tels que la classe de résistance du ciment et le rapport E/C , sur K_{int} y sont présentés. On récapitule, pour chacun de ces différents paramètres, les résultats de l'évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation du béton.

IV.2. Résultats des essais de perméabilité apparente au gaz

IV.2.1. Perméabilité au gaz à l'état sec

On présente dans ce paragraphe, les résultats de la perméabilité apparente (K_{app}) sur les quatre bétons choisis pour étude, ainsi que la valeur de la perméabilité intrinsèque (K_{int}) de chaque béton obtenue selon la méthode de Klinkenberg (cf. § II.2.2.4). Nous rappelons que les essais de perméabilité au gaz effectués comprennent en général cinq mesures de perméabilité apparente relative à différentes pressions différentielles (P_i) (cf. § III.7.1). La Fig. IV-1 présente l'évolution de la perméabilité apparente des quatre bétons en fonction de l'inverse de la pression moyenne ($1/P_m$). Les mesures couvrent une gamme de pressions absolues entre 1 et 3 bars, appliquées sur une face plane de chaque échantillon de béton (cf. Annexe B). Les résultats présentés correspondent à un échantillon à l'état sec ($S_r = 0$) de chaque béton (il ne s'agit pas ici de moyennes). Mais chaque essai de perméabilité a été répété sur trois échantillons de chaque béton et de même gâchée. Les résultats sont bien reproductibles pour les quatre BO et les courbes choisies sont représentatives de l'ensemble des résultats.

À partir de la régression linéaire des résultats de K_{app} mesuré à différentes pressions (cf. Fig. IV-1), cette droite appelée « droite de Klinkenberg » nous indique deux paramètres : K_{int} et β où $\beta \cdot K_{int}$ est la pente de cette droite. Pour toutes les droites tracées, nous avons obtenues des coefficients de régression R^2 d'environ 0.98 et 0.99, ce qui indique une linéarité presque parfaite entre K_{app} et $1/P_m$.

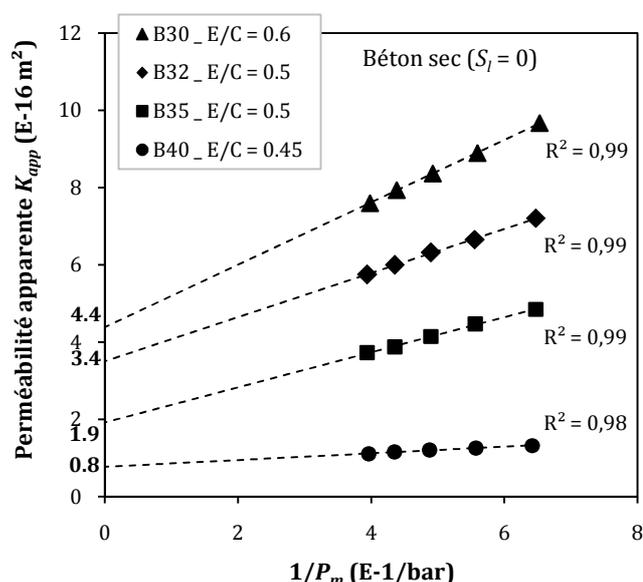


Fig. IV-1. Perméabilité au gaz des bétons testés à l'état sec en fonction de l'inverse de la pression moyenne appliquée.

La Fig. IV-1 montre que la perméabilité apparente est non seulement dépendante du milieu poreux ; mais aussi de la pression appliquée pendant l'essai. Les résultats obtenus montrent aussi que le béton avec un rapport E/C plus élevé (c.à.d. avec une valeur de porosité accessible à l'eau plus grande) a une valeur de coefficient de la perméabilité plus importante. On remarque aussi que la pente $\beta \cdot K_{int}$ de la droite de Klinkenberg augmente avec la porosité du matériau.

IV.2.2. Influence du degré de saturation sur la perméabilité apparente

Les Figs. IV-2, IV-3, IV-4 et IV-5 montrent l'évolution des perméabilités apparentes des quatre BO étudiés en fonction de l'inverse de différentes pressions moyennes ($1/P_m$), ainsi que les perméabilités intrinsèques obtenues selon l'approche de Klinkenberg pour quatre degrés de saturation (S_l) différents (de l'état sec à 77 % de saturation). Nous rappelons que tous les échantillons testés sont de la même taille (5 cm de hauteur et 15 cm de diamètre) et leurs degrés de saturation ont été déterminés par pesées après préconditionnement (cf. § III.9). Les résultats présentés sur ces figures correspondent à un échantillon pour chaque béton (il ne s'agit pas de moyennes).

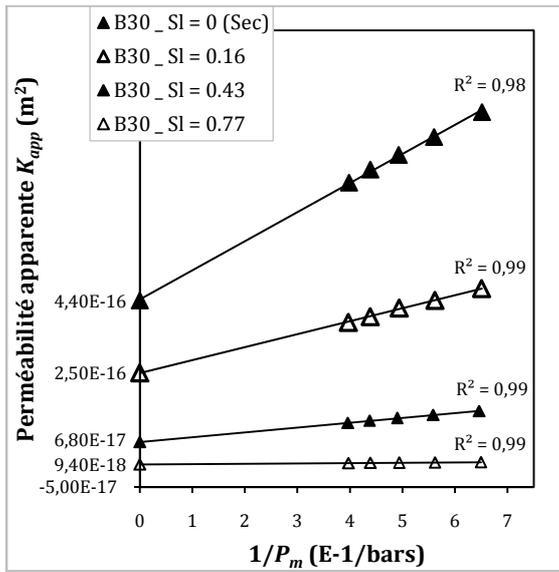


Fig. IV-2. Perméabilité au gaz du béton B30 à différents degrés de saturation.

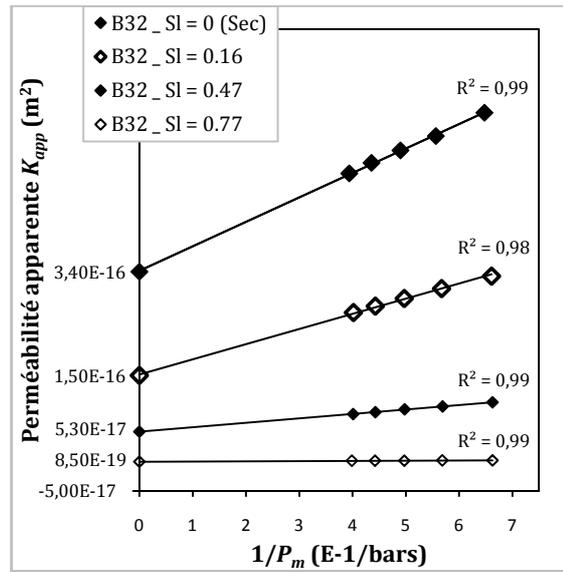


Fig. IV-3. Perméabilité au gaz du béton B32 à différents degrés de saturation.

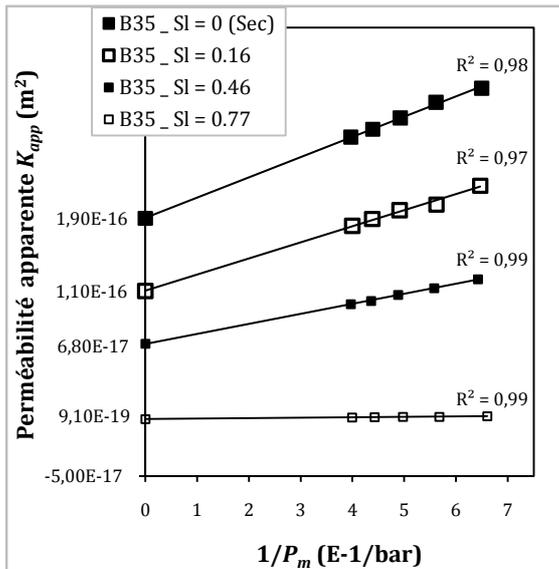


Fig. IV-4. Perméabilité au gaz du béton B35 à différents degrés de saturation.

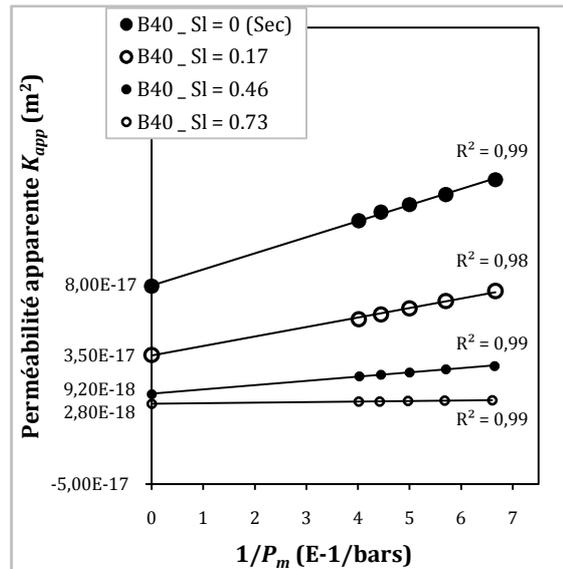


Fig. IV-5. Perméabilité au gaz du béton B40 à différents degrés de saturation.

Les résultats montrent que la perméabilité est influencée par le degré de saturation en eau du béton. Ceci confirme les résultats obtenus par plusieurs chercheurs ; la perméabilité au gaz d'un corps d'épreuve en béton augmente quand le taux de saturation moyen diminue [ABBA 99], [PICA 01a]. La pente $\beta \cdot K_{int}$ de la droite de Klinkenberg en fonction du degré de saturation (S_l) complète la caractérisation du béton testé [VILL 01]. Elle permet de calculer la perméabilité apparente du béton à une pression moyenne différente de celle utilisée pour la mesure à partir de l'Eq. (III-3).

L'ensemble des résultats de perméabilités mesurées à différents degrés de saturation et à différentes pressions d'injection, correspondant aux courbes illustrées sur les Figs. IV-2, IV-3, IV-4 et IV-5, sont récapitulés sur le Tab. IV-1.

Tab. IV-1. Résultats de perméabilité aux gaz des quatre bétons étudiés pour différents degrés de saturation.

	S_r (%)	K_g (m ²) pour $P_{inj} = 1$	K_g (m ²) pour $P_{inj} = 1,5$	K_g (m ²) pour $P_{inj} = 2$	K_g (m ²) pour $P_{inj} = 2,5$	K_g (m ²) pour $P_{inj} = 3$	K_g (m ²) pour $P_{inj} = +\infty$	β (bar)
B30	0	9,35E-16	8,69E-16	8,22E-16	7,84E-16	7,50E-16	$K_{int} = 4,4E-16$	0,338
	16	4,71E-16	4,41E-16	4,20E-16	3,97E-16	3,82E-16	$K_{int} = 2,5E-16$	0,297
	43	1,49E-16	1,40E-16	1,31E-16	1,24E-16	1,18E-16	$K_{int} = 6,8E-17$	0,209
	77	1,54E-17	1,46E-17	1,39E-17	1,33E-17	1,28E-17	$K_{int} = 9,4E-18$	0,067
B32	0	6,05E-16	5,65E-16	5,40E-16	5,18E-16	5,00E-16	$K_{int} = 3,4E-16$	0,317
	16	3,22E-16	3,01E-16	2,84E-16	2,70E-16	2,59E-16	$K_{int} = 1,5E-16$	0,269
	47	1,04E-16	9,65E-17	9,15E-17	8,68E-17	8,34E-17	$K_{int} = 5,3E-17$	0,194
	77	3,22E-18	2,89E-18	2,63E-18	2,46E-18	2,29E-18	$K_{int} = 8,5E-19$	0,060
B35	0	2,96E-16	2,83E-16	2,69E-16	2,59E-16	2,52E-16	$K_{int} = 1,9E-16$	0,310
	16	2,09E-16	1,92E-16	1,87E-16	1,80E-16	1,73E-16	$K_{int} = 1,1E-16$	0,248
	46	1,25E-16	1,18E-16	1,12E-16	1,06E-16	1,03E-16	$K_{int} = 6,8E-17$	0,183
	77	3,38E-18	3,02E-18	2,75E-18	2,56E-18	2,40E-18	$K_{int} = 9,1E-19$	0,057
B40	0	1,50E-16	1,40E-16	1,34E-16	1,29E-16	1,23E-16	$K_{int} = 8,0E-17$	0,277
	17	7,68E-17	7,04E-17	6,56E-17	6,17E-17	5,85E-17	$K_{int} = 3,5E-17$	0,230
	46	2,75E-17	2,58E-17	2,33E-17	2,19E-17	2,08E-17	$K_{int} = 9,2E-18$	0,159
	73	5,23E-18	4,90E-18	4,64E-18	4,40E-18	4,27E-18	$K_{int} = 2,8E-18$	0,070

Les résultats récapitulés sur le Tab. IV-1 confirme l'évolution de la perméabilité au gaz en fonction de la saturation : la perméabilité diminue avec l'augmentation du degré de saturation du matériau. Par ailleurs, la constante de Klinkenberg (β) diminue avec la saturation. Sa valeur dépend de la structure poreuse du béton : elle diminue avec la diminution de la porosité ouverte du matériau (cf. § IV.6.4). La pente $\beta \cdot K_{int}$ de la droite de Klinkenberg en fonction du degré de saturation (S_l), est donc plus importante quand le matériau est d'une porosité plus élevée tel que dans le cas du béton B30 par exemple (cf. Figs. IV-1, IV-2, IV-3, IV-4 et IV-5).

IV.2.2.1. Nature de l'écoulement du gaz pendant l'essai de perméabilité CEMBUREAU

Les essais de perméabilité sont réalisés à l'aide d'un perméamètre Cembureau à pression constante en régime permanent, et le calcul de la perméabilité apparente est basé sur la loi de Darcy. Selon plusieurs auteurs (Perraton *et coll.*, 1999) [PERR 99], (Villain *et coll.*, 2001) [VILL 01], il est nécessaire de vérifier la nature de l'écoulement du gaz durant l'essai de perméabilité CEMBUREAU, car la détermination de la perméabilité intrinsèque par l'approche de Klinkenberg se place dans le cadre d'un écoulement visqueux (cf. § II.2.1.4 et § II.2.2.4).

Selon Perraton (1992) [PERR 92a], les points de mesure correspondant à un écoulement visqueux sont alignés ainsi que la pente de la droite de Klinkenberg doit être égale à 1. Dans le cas d'une pression moyenne (P_m) variable durant l'essai et de forts débits gazeux, les points de mesure ne sont plus alignés et la courbe a une concavité tournée vers l'axe des abscisses (pente en tout point inférieure à 1) [VILL 01].

Nous avons appliqué cette méthode pour vérifier la nature de l'écoulement du gaz pour chaque échantillon du béton testé dans cette étude. Les Figs. IV-6, IV-7, IV-8 et IV-9 présentent les résultats obtenus sur des corps d'épreuve de même taille (15 x 5) cm et pour quatre différents degrés de saturation. Au vu de ces courbes, il est clair que la propriété de linéarité est bien respectée pour les quatre bétons de différentes prométries et pour des taux de saturation variables, ainsi que la pente de la droite est toujours supérieure à 1 ; ce qui est en accord avec les hypothèses des auteurs de la méthode. On considère donc, que l'écoulement est visqueux et la perméabilité intrinsèque peut être approchée, dans cette étude, par la théorie de Klinkenberg (cf. § II.2.2.4).

Les Figs. IV-6, IV-7, IV-8 et IV-9, montrent aussi que le débit du gaz qui traverse l'échantillon de béton augmente quand le degré de saturation diminue. Le débit est donc non seulement influencé par la pression d'injection ; mais aussi par l'état hydrique du matériau.

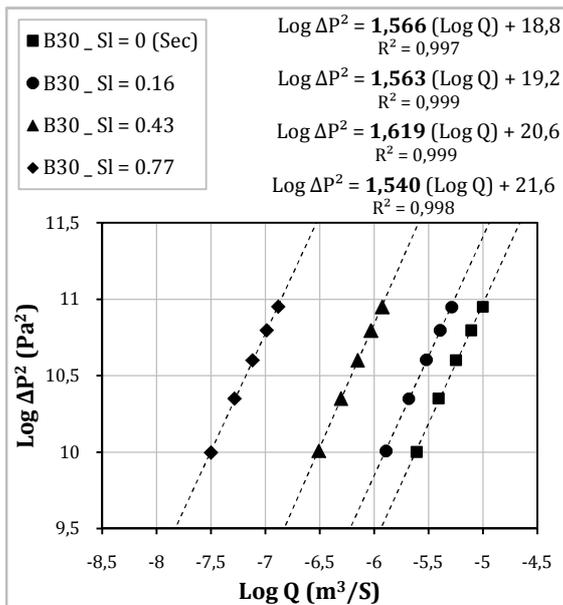


Fig. IV-6. Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B30.

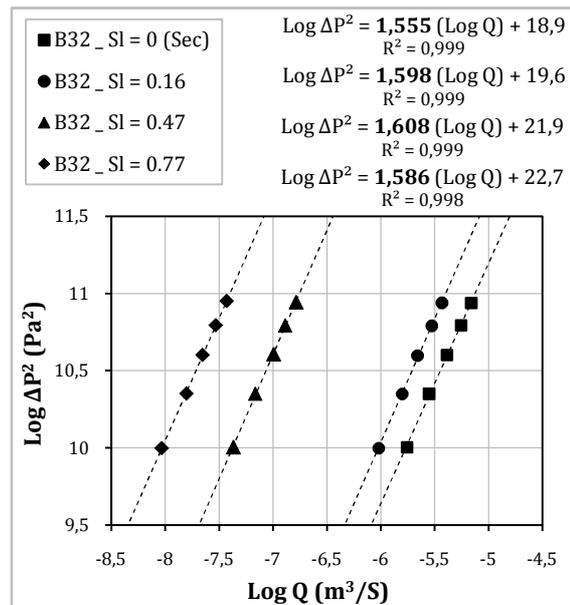


Fig. IV-7. Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B32.

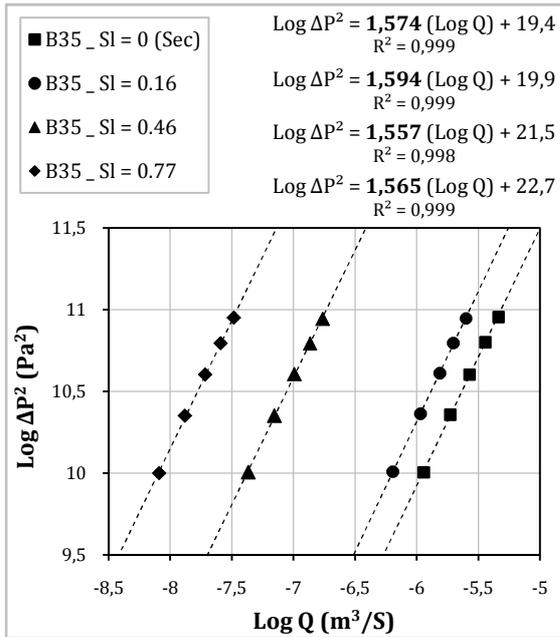


Fig. IV-8. Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B35.

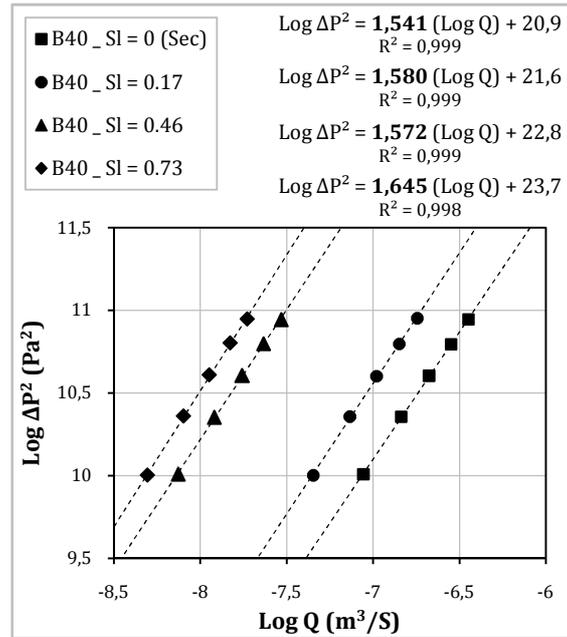


Fig. IV-9. Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B40.

IV.2.2.2. Analyse de la contribution de l'écoulement non-visqueux pendant l'essai de perméabilité au gaz

Dans un milieu poreux non saturé, l'eau et le solide se comportent plus au moins de la même manière en bloquant le gaz percolant [LIU 11]. Quand la teneur en eau dans le réseau poreux est élevée, presque tous les pores, ayant des tailles comparables au libre parcours moyen du gaz, sont remplis d'eau [ABBA 99]. Quand il y a une homogénéisation de la teneur en eau à l'intérieur du réseau poreux, il existe une tendance pour l'eau (étant un fluide mouillant) d'occuper les pores de diamètre relativement plus petit, dû à une dérive capillaire. Pour le gaz (fluide non-mouillant), c'est l'inverse. Ceci indique que les macropores sont vidangés les premiers et les micropores les derniers lors d'un séchage. Par ailleurs, lorsque la taille des pores est du même ordre de grandeur que le libre parcours moyen des molécules du gaz de percolation, il existe un certain écoulement moléculaire qui ne vérifie pas les hypothèses de la loi de Darcy et, par conséquent, le coefficient de perméabilité du gaz varie avec la pression moyenne appliquée [DHIR 89], [ABBA 99]. Dans une tentative de prendre en compte ces effets, nous avons essayé, dans cette étude, en utilisant l'approche de Klinkenberg, de quantifier les différents types d'écoulement (visqueux et moléculaire (cf. § II.2.2.4 et Fig. II-10)).

Le paramètre utilisé pour l'estimation de la contribution de l'écoulement moléculaire (non-visqueux) dans l'écoulement total du gaz nitrogène à travers l'échantillon de béton, pendant l'essai Cembureau, est le coefficient de Klinkenberg β (cf. § II.2.2.4). Donc, comme indiqué sur la Fig. IV-10, la partie de l'écoulement moléculaire (écoulement de type Knudsen) est calculé de la façon suivante :

$$Q_{total} = Q_{moléculaire} + Q_{visqueux} \quad (IV - 1)$$

À partir de l'Eq. (III-3):

$$Q_{total} = K_{app} \cdot \left(\frac{A (P_{inj}^2 - P_{atm}^2)}{2 P_{atm} \cdot L \cdot \mu} \right) \quad (IV - 2)$$

$$Q_{total} = \left(K_{int} + \frac{K_{int} \cdot \beta}{P_m} \right) \cdot \left(\frac{A (P_{inj}^2 - P_{atm}^2)}{2 P_{atm} \cdot L \cdot \mu} \right) \quad (IV - 3)$$

Ainsi:

$$Q_{moléculaire} = \left(\frac{K_{int} \cdot \beta}{P_m} \right) \cdot \left(\frac{A (P_{inj}^2 - P_{atm}^2)}{2 P_{atm} \cdot L \cdot \mu} \right) \quad (IV - 4)$$

Donc:

$$\frac{Q_{moléculaire}}{Q_{total}} = \frac{\left(\frac{K_{int} \cdot \beta}{P_m} \right)}{\left(K_{int} + \frac{K_{int} \cdot \beta}{P_m} \right)} = \frac{\left(\frac{\beta}{P_m} \right)}{\left(1 + \frac{\beta}{P_m} \right)} = \frac{\beta}{(P_m + \beta)} \quad (IV - 5)$$

Les résultats de la contribution de l'écoulement moléculaire dans l'écoulement total, pendant l'essai de la perméabilité au gaz du béton B35, mesurée à différentes pressions P_m , sont présentés en fonction de la saturation en eau sur la Fig. IV-10. Les résultats obtenus montrent que la contribution de l'écoulement moléculaire est non seulement influencée par l'état hydrique du béton ; mais aussi par la pression moyenne appliquée sur l'échantillon testé. L'écoulement moléculaire diminue donc avec l'augmentation du degré de saturation à cause de la continuité existante entre les molécules d'eau, empêchant la percolation du gaz à travers le béton. Ainsi, plus la valeur de la pression P_m est élevée et plus la contribution de l'écoulement moléculaire dans l'écoulement total est moins importante pendant les essais de perméabilité CEMBUREAU. Ceci confirme la fiabilité de la méthode Klinkenberg pour séparer les différents types de flux, en calculant K_{int} quand P_m tend vers l'infini (c.à.d. lorsque le gaz tend vers une phase condensée (liquide)).

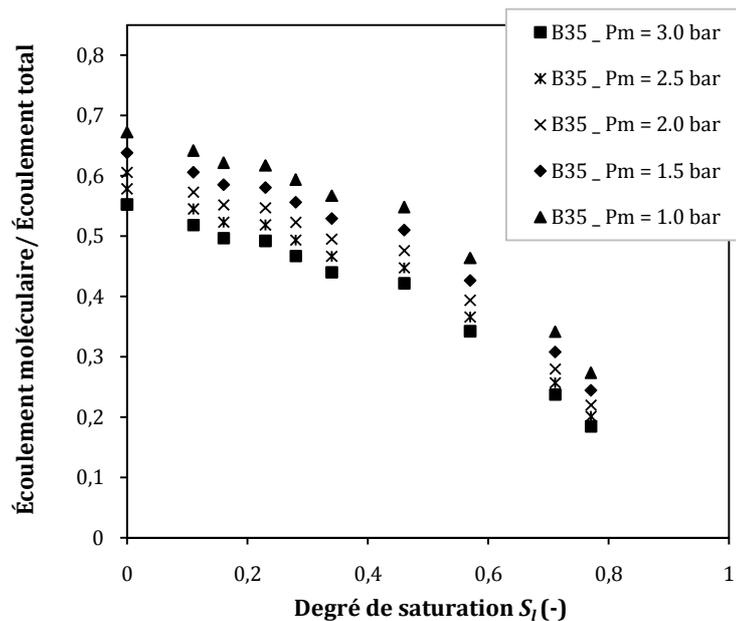


Fig. IV-10. Évolution de la contribution de l'écoulement moléculaire du gaz à travers le béton B35 en fonction de son degré de saturation.

À des degrés de saturation d'environ 80 %, tous les pores (principalement les grands pores) commencent à devenir vides. Cela signifie qu'une partie de l'écoulement est moléculaire dans la toute première mesure pour chacune des cinq valeurs de pression moyenne (contribution de 18 % à 27 % de $Q_{moléculaire}/Q_{total}$ correspondant respectivement à des valeurs de pression P_m égales à 3 et 1 bar) (cf. Fig. IV-10).

Les résultats montrent qu'à un degré de saturation égal à 57 %, les pores de petites tailles dans le béton B35 commencent à être vides et l'écoulement moléculaire commence à contribuer significativement dans l'écoulement total du nitrogène. À l'état presque parfaitement sec, cette contribution totale de l'écoulement moléculaire, pendant l'essai de perméabilité du béton B35, peut être supérieure de 60 % de l'écoulement total du gaz (cf. Fig. IV-10). De cette manière, deux types de flux évoluent donc en même temps au cours des essais de perméabilité et au cours du processus de séchage. On conclue qu'il y a une contribution croissante de l'écoulement moléculaire du gaz quand le degré de saturation en eau liquide diminue à l'intérieur du réseau poreux du béton.

IV.3. Évolution de la perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation

L'évolution de K_{int} des quatre bétons étudiés (B30, B32, B35 et B40), en fonction de leurs degrés de saturation mesurés par pesées après un préconditionnement des échantillons (séchage par palier à 60 °C) (décrit dans le § III.9), est présentée pour chaque béton sur les Figs. IV-11, IV-12, IV-13 et IV-14. Sur ces figures, une moyenne arithmétique de trois mesures sur trois échantillons de même diamètre ($D = 15$ cm) est calculée pour chaque degré de saturation. Un récapitulatif des résultats de perméabilité intrinsèque des trois échantillons testés, mesurée à différents degrés de saturation pour chaque béton étudié, sont présentés dans l'Annexe E.

Les résultats montrent que la perméabilité intrinsèque de tous les bétons est très influencée par leurs degrés de saturation en eau liquide et les valeurs de K_{int} représentent une même tendance dans toute la gamme de mesure. Ceci est en accord avec les résultats obtenus par différents chercheurs [LUCK 89], [ABBA 99], [VILL 01], [BIPA 05].

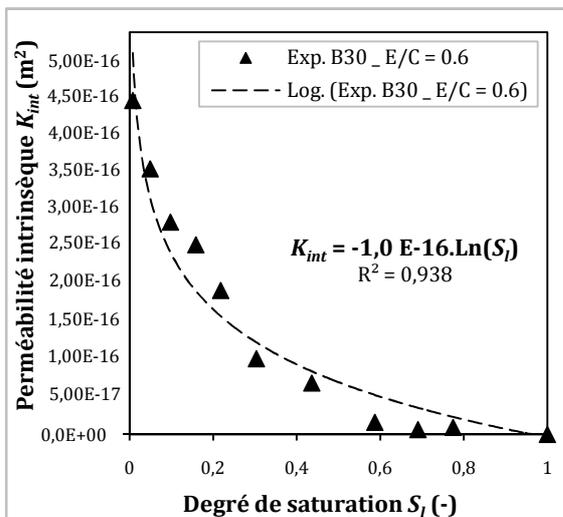


Fig. IV-11. Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B30.

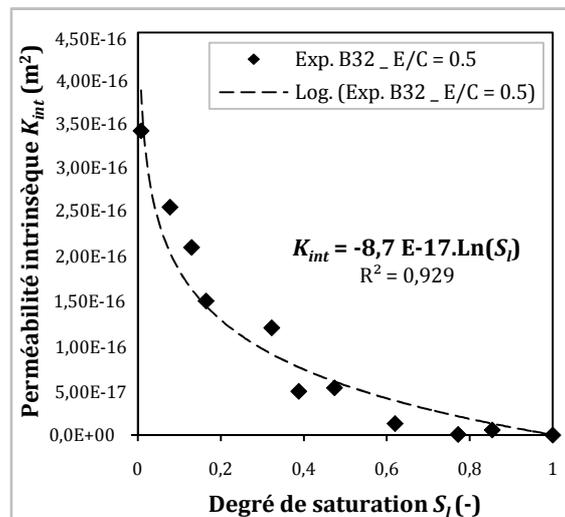


Fig. IV-12. Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B32.

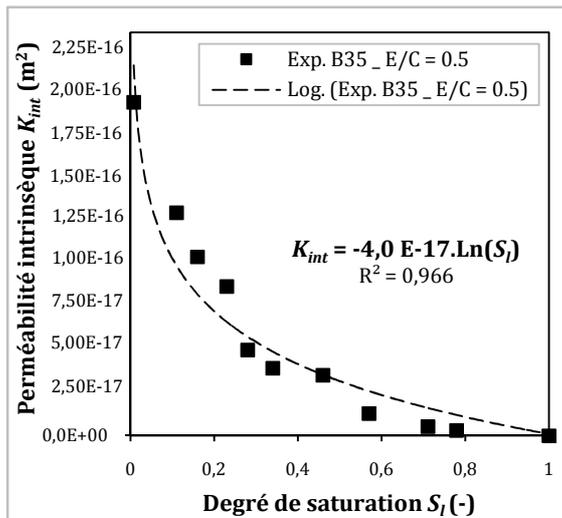


Fig. IV-13. Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B35.

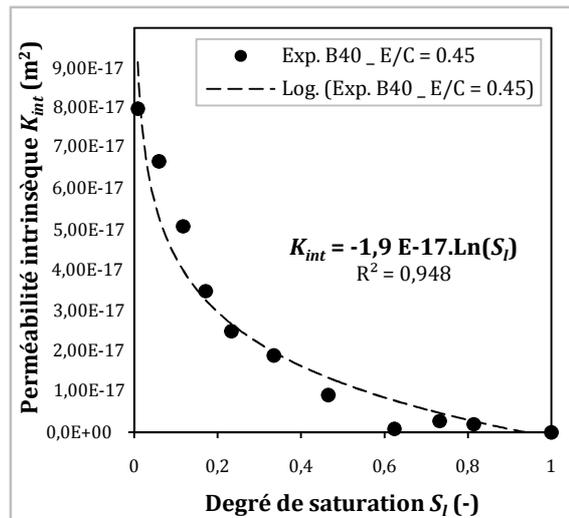


Fig. IV-14. Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B40.

L'augmentation de K_{int} est très lente quand les échantillons de béton sont presque saturés et devient notamment plus rapide quand ils sont près de l'état sec. Comme précisé plus haut, la continuité entre les molécules d'eau dans le réseau poreux du béton empêche le passage du gaz et par conséquent, la perméabilité au gaz augmente quand le degré de saturation diminue.

À partir des Figs. IV-11, IV-12, IV-13 et IV-14, on remarque une décroissance significative de la perméabilité des quatre bétons dans l'intervalle de : $0 < S_l \leq 0.25$). Il est remarqué aussi que dans cet intervalle, la variation entre les valeurs de K_{int} des différents bétons devient plus significative, car dans cette gamme de S_l , les pores vides commencent à devenir plus interconnectés. Les résultats montrent aussi que pour $S_l > 0.6$, on ne peut distinguer entre les valeurs des perméabilités intrinsèques des quatre bétons à cause des valeurs faibles obtenues. Ce résultat est expliqué par le fait que dans l'intervalle : $0.6 \leq S_l \leq 1$), les molécules d'eau sont relativement liées dans le réseau poreux du matériau ; ce qui empêche le passage du gaz à travers le béton. Alors, avec plus de teneur en eau qui est considérablement homogène dans le matériau, le séchage d'une partie des pores ne fournit pas de nombreux passages dans le béton pour la percolation du gaz nitrogène.

Les courbes de K_{int} en fonction du degré de saturation peuvent être présentées par des courbes logarithmiques ou polynomiales. Ces résultats sont en accord avec ceux présentés sur un béton ordinaire par Abbas *et coll.* (1999) [ABBA 99] et sur des BHP par Villain *et coll.* (2001) [VILL 01]. Une courbe de tendance des valeurs calculées sur les données expérimentales, en utilisant une fonction "Ln", est également représentée pour chaque béton sur les Figs. IV-11, IV-12, IV-13 et IV-14. Les données expérimentales peuvent être estimées correctement, en utilisant une fonction Ln, où $R^2 > 0.9$ pour tous les bétons ; mais il est observé sur les figures qu'il est difficile d'établir une loi unique (une seule et même fonction logarithmique) pour l'évolution de K_{int} en fonction de S_l pour différents bétons ordinaires.

IV.4. Évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation

À partir des mesures de la perméabilité intrinsèque (K_{int}) des échantillons de béton non saturés, il est possible de déduire une courbe $K_{rg} = K_{rg}(S_l)$, où K_{rg} est la perméabilité relative au gaz. Pour chaque béton ordinaire étudié, la perméabilité relative au gaz a été calculée et les valeurs sont illustrées sur les Figs. IV-15, IV-16, IV-17 et IV-18.

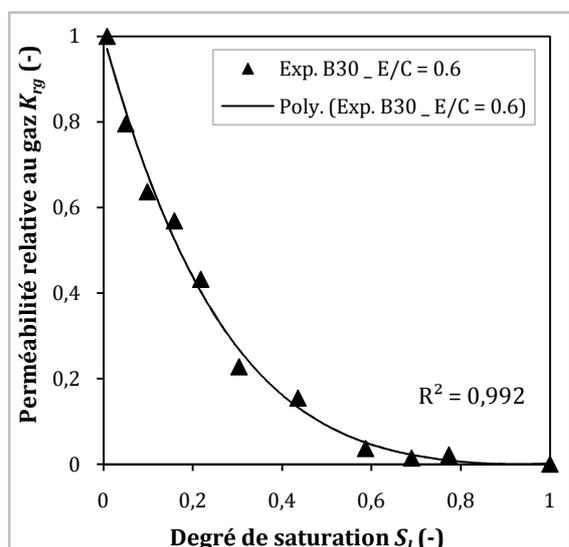


Fig. IV-15. Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B30.

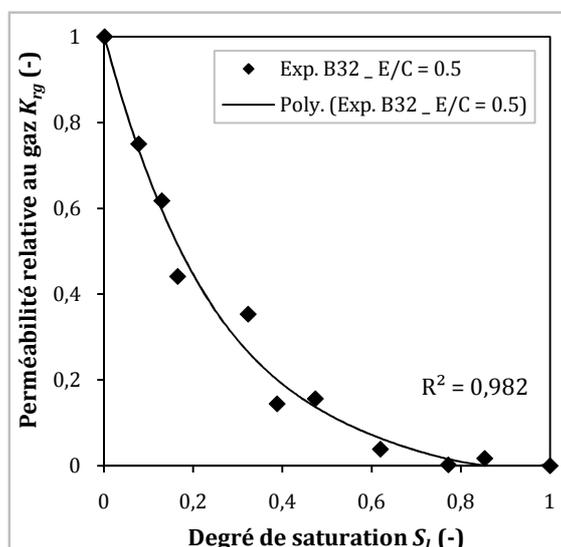


Fig. IV-16. Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B32.

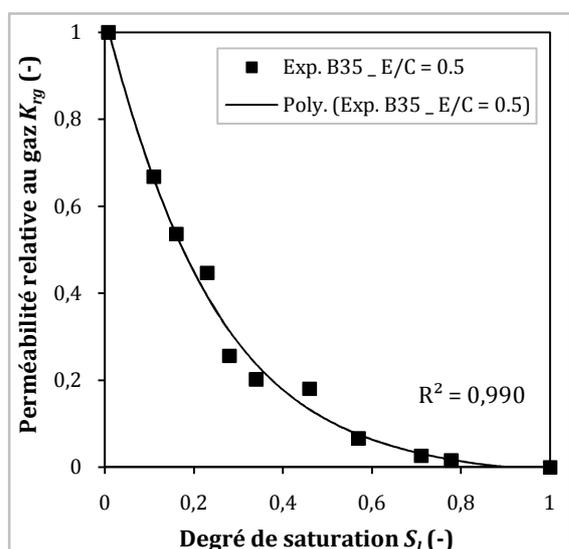


Fig. IV-17. Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B35.

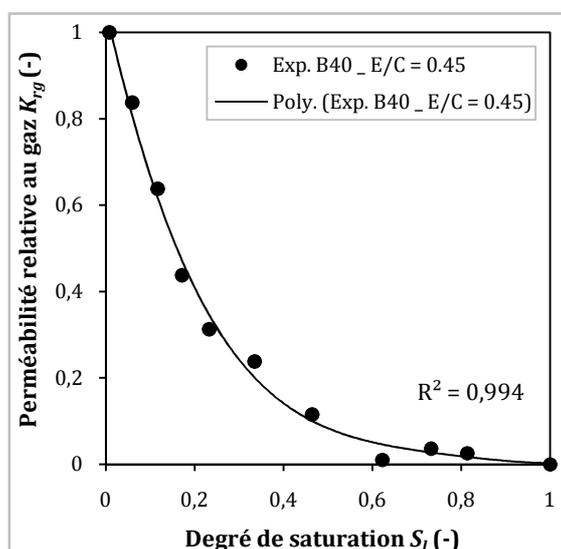


Fig. IV-18. Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B40.

Les résultats obtenus montrent que la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation en eau donne une courbe concave. Monlouis-Bonnaire (2004) [MONL 04] et Liu (2011) [LIU 11] trouvent la même tendance pour un béton. Caré et Derks (2011) [CARÉ 11] trouve aussi la même tendance pour des pâtes de ciment à différents rapports eau/ciment. Il est observé que K_{rg} peut être corrélée avec le degré de saturation (S_l) du matériau.

La perméabilité relative au gaz marque la diminution de l'espace poreux accessible aux fluide quand la saturation liquide augmente, et inversement. Dans un intervalle restreint de variation du degré de saturation : $0 < S_l \leq 0.25$, la perméabilité relative au gaz décroît fortement pour atteindre une valeur de 0.3 (la perméabilité mesurée à $S_l = 0.25$ est égale à environ 30 % de K_{int} mesuré à $S_l = 0$). Au-delà du degré de saturation de 0.6, la perméabilité relative des quatre bétons tend vers zéro et devient quasiment nulle (cf. Figs. IV-15, IV-16, IV-17 et IV-18).

Différents chercheurs [ABBA 99], [VILL 01] proposent différents coefficients de corrélation pour tenter de quantifier l'influence de la saturation en eau sur la perméabilité d'un milieu poreux. Les courbes de $K_{r,g}$ en fonction du degré de saturation peuvent être présentées par des courbes logarithmiques ou polynomiales [VILL 01]. Une régression polynomiale des données expérimentales obtenus, en utilisant une fonction "Poly", est également représentée pour chaque béton sur les Figs. IV-15, IV-16, IV-17 et IV-18. Les résultats obtenus montrent que les données expérimentales peuvent donc être estimées correctement, en utilisant une fonction polynomiale, où $R^2 > 0.98$ pour tous les bétons étudiés.

IV.5. Influence du préconditionnement des échantillons sur la perméabilité au gaz

La difficulté du préconditionnement est de permettre le séchage d'un corps d'épreuve dans une durée raisonnable ($t < 2$ mois), sans provoquer d'endommagement et où l'humidité est homogène. On a testé deux protocoles de séchage pour arrêter le conditionnement des corps d'épreuve à préconiser préalablement aux mesures de la perméabilité au gaz (cf. § III.8).

Les évolutions de la perméabilité apparente au gaz des échantillons (15 x 5) cm du béton B35 en fonction de deux températures de séchage : 60 et 80° C et quatre degrés de saturation, sont présentés sur la Fig. IV-19.

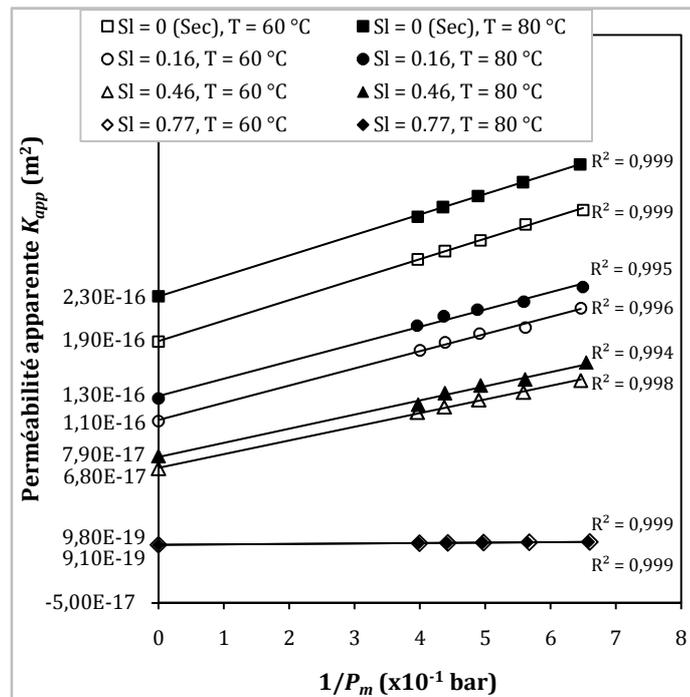


Fig. IV-19. Perméabilité apparente au gaz en fonction de $1/P_m$ pour le béton B35 séché à 60 et à 80° C.

Les résultats obtenus montrent que le mode de séchage a une influence directe sur la perméabilité au gaz des bétons, mesurée à différentes pressions et donc sur la perméabilité intrinsèque obtenue (cf. Fig. IV-19). Les valeurs de la perméabilité apparente, obtenues pour un séchage à 80° C sont relativement plus élevées que celles obtenues pour 60° C. Cette différence est clairement observée quand les échantillons de béton sont à $S_l < 0.5$ (c.à.d. quand il y a une discontinuité entre les molécules d'eau liquide dans le réseau poreux du matériau). Donc, plus le degré de saturation est faible et plus la variation entre les valeurs de K_{int} mesurées à différentes températures est significative.

La nature de l'écoulement du gaz percolant pendant l'essai de la perméabilité CEMBUREAU a été aussi vérifiée pour les échantillons du béton B35 séchés par palier à 80° C. La Fig. IV-20, montre une comparaison entre les résultats obtenus dans le cas d'un séchage à 60° C et à 80° C. On rappelle qu'il ne s'agit pas ici de la moyenne arithmétique de trois valeurs obtenues.

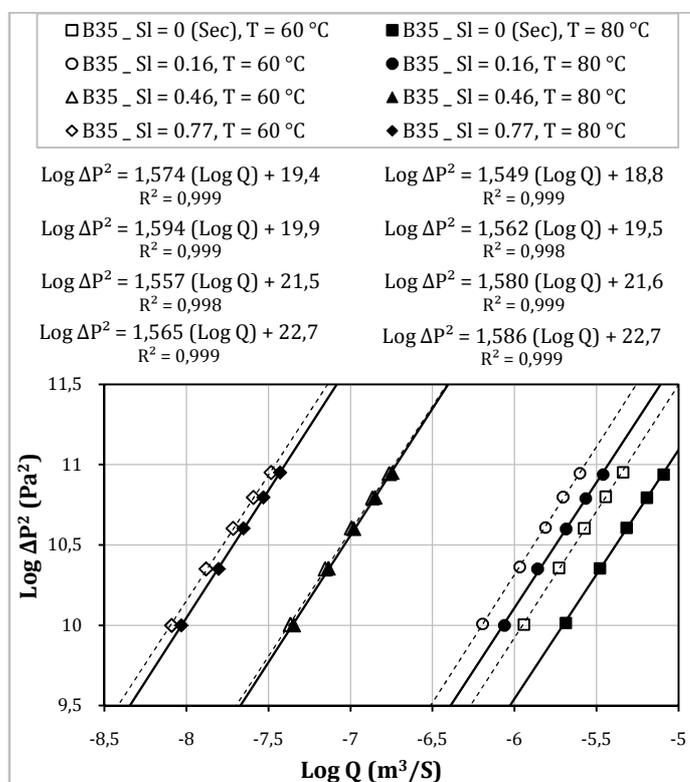


Fig. IV-20. Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B35.

Il est clairement observé sur la Fig. IV-20 que la propriété de linéarité est bien respectée dans le cas des deux températures de séchage (60 et 80° C) et pour des échantillons du béton à différents degrés de saturation. La pente est ainsi toujours supérieure à 1. On considère donc, selon les hypothèses de Perraton *et coll.* (1992) [PERR 92], que l'écoulement est visqueux même à travers un béton séché à 80° C et sa perméabilité intrinsèque peut alors être déterminée suivant l'approche de Klinkenberg.

La Fig. IV-20, montre aussi que le débit du gaz nitrogène (Q_{N_2}) qui passe à travers les échantillons de béton séchés à 80° C est plus élevé par rapport au débit percolant les

échantillons séchés à 60° C. Cette variation en Q_{N_2} entre les deux séries d'échantillons séchées à des températures différentes, peut être clairement remarquée quand $S_l \leq 0.5$, c'est-à-dire lorsque les pores ne sont plus remplis d'eau et commencent à être vides.

La Fig. IV-21, montre l'évolution de la perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour les deux séries d'échantillons du béton B35 séchés à 60 et 80° C. Les résultats présentés sur cette figure correspondent à la moyenne arithmétique de trois valeurs de K_{int} mesurées sur trois échantillons de 15 cm de diamètre.

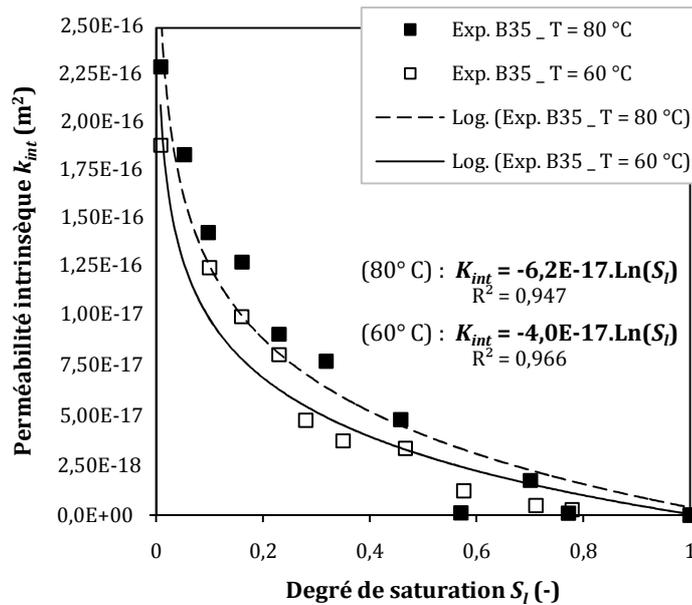


Fig. IV-21. Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B35 séché à 60° C et à 80° C.

Quoique les résultats de K_{int} obtenus par un séchage à 60° et 80° C sont du même ordre de grandeur ; mais le séchage à 80° C a permis d'obtenir des valeurs de K_{int} relativement plus élevées (par exemple à l'état sec : $K_{int}(80°) = 2.3E-16 m^2$ et $K_{int}(60°) = 1.9E-16 m^2$). La Fig. IV-21 montre aussi qu'il est possible d'estimer correctement les données expérimentales de perméabilité intrinsèque du béton en fonction de S_l en utilisant une fonction logarithmique Ln , où $R^2 > 0.9$. À partir de ces régressions logarithmiques, on peut observer encore qu'il est difficile d'établir, pour un même béton ordinaire, une seule et même loi logarithmique pour l'évolution de K_{int} en fonction de S_l pour deux séries d'échantillons séchées à des températures différentes. Ce qui nous laisse penser que l'augmentation de la température de séchage pour le préconditionnement des échantillons risque de modifier la structure poreuse du matériau et, pour un même degré de saturation, la proportion des pores vides interconnectés dans le matériau séché à 80° C pourra être plus importante que celle dans un même matériau séché à 60° C.

En effet, une température de séchage trop élevée peut engendrer une évaporation de l'eau liée et une modification des hydrates, l'ettringite puis les C-S-H [BARO 94], [PERR 99]. Il est à noter que les effets secondaires du séchage à des températures élevées relativement sensibles sur des bétons de faible rapport E/C (cas des BHP) que sur des bétons plus poreux (BO) [QUÉN 97], [TSIV 98]. La mesure seule de la perméabilité n'est donc pas

suffisante pour discriminer des bétons sans mode de préconditionnement défini. On peut dans ce cas rapporter, qu'il est possible de caractériser chaque béton par une courbe de perméabilité intrinsèque au gaz en fonction de son degré de saturation, après un séchage optimisé des échantillons testés et un contrôle de l'homogénéité de leur état hydrique.

Les résultats de la perméabilité relative au gaz (K_{rg}) en fonction de S_l des deux séries d'échantillons du béton B35 séchées différemment à 60° et à 80° C, sont présentés sur la Fig. IV-22.

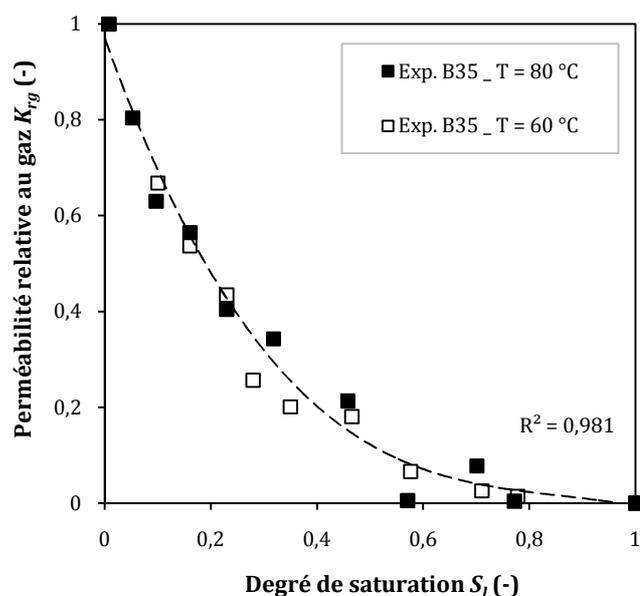


Fig. IV-22. Perméabilité relative au gaz en fonction de degré de saturation pour le béton B35 séché à 60° et à 80° C.

Les résultats montrent une décroissance très importante de K_{rg} des deux séries d'échantillons dans un intervalle restreint du degré de saturation : $0 < S_l \leq 0,25$). On ne peut distinguer entre les valeurs de K_{rg} des deux séries d'échantillons testés dans cette gamme de S_l . En revanche, pour l'intervalle intermédiaire de : $0,3 \leq S_l \leq 0,5$), la perméabilité relative au gaz obtenue pour un séchage à 80° C représente des valeurs légèrement supérieures à celles obtenues pour 60° C. Nous pensons que dans cet intervalle du degré de saturation, la discontinuité entre les molécules d'eau dans le réseau poreux d'un béton peut être accélérée à l'aide d'un séchage plus avancé en température. Au-delà d'une saturation de 50 %, les résultats de la perméabilité relative des deux séries d'échantillons ne peuvent être distingués et représentent des valeurs très faibles à quasiment nulles.

Enfin, la microfissuration qui peut être engendrée par un séchage à 80° C ne représente qu'un caractère superficiel et n'affecte pas le cœur de l'éprouvette. Ce dernier point laisse supposer une incidence mineure de ces microfissurations sur la perméabilité.

IV.6. Influence du rapport E/C sur les propriétés de transfert de béton

IV.6.1. Influence du rapport E/C sur la perméabilité intrinsèque du béton

Dans ce paragraphe, les résultats de la perméabilité et de la porosité au mercure des bétons B30, B35 et B40 sont présentés. La Fig. IV-23 montre l'évolution de la perméabilité

intrinsèque des trois bétons en fonction de leurs degrés de saturation. Les résultats présentés sur cette figure sont les moyennes arithmétiques de trois valeurs de perméabilité obtenues sur trois échantillons de chaque béton. Nous rappelons que les échantillons testés dans ce paragraphe sont de même diamètre ($D = 15 \text{ cm}$) et ont été pré-conditionnés par un séchage à 60° C .

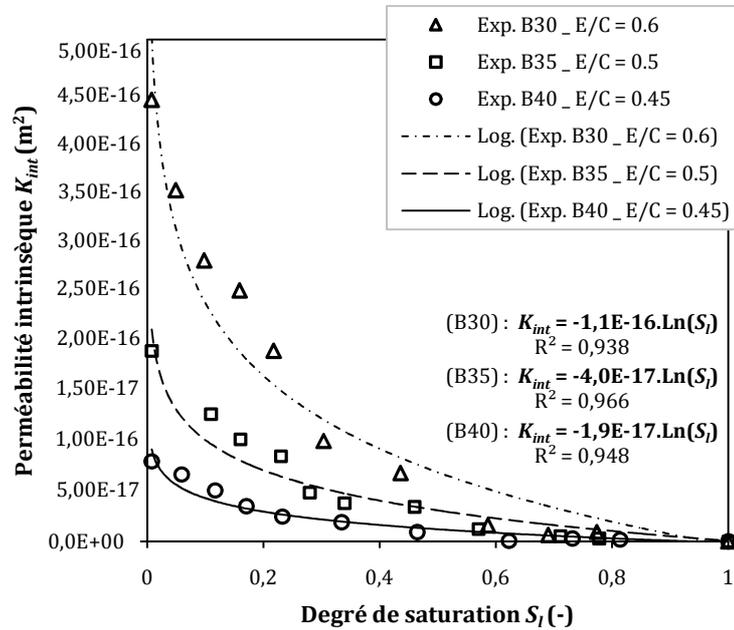


Fig. IV-23. Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation des bétons : B30, B35 et B40.

Les résultats illustrés sur la Fig. IV-23, montrent que pour différents degrés de saturation, les valeurs de perméabilité intrinsèque obtenues pour le béton B40 sont relativement faibles par rapport aux valeurs de K_{int} obtenues pour le béton B35 et encore plus faible par rapport à celles du béton B30. Alors, à partir des courbes obtenues (cf. Fig. IV-23), on peut conclure que la perméabilité du béton est plus importante quand le rapport E/C est plus élevé. Ceci peut être expliqué par l'augmentation de la porosité ouverte du matériau : $\Phi_{Eau}(B40) = 12.7 \%$, $\Phi_{Eau}(B35) = 13.9 \%$ et $\Phi_{Eau}(B30) = 15.2 \%$. À l'état complètement sec, les perméabilités intrinsèques des bétons : B30, B35 et B40 sont égales respectivement à : $4,4E-16 \text{ m}^2$, $1,9E-16 \text{ m}^2$ et $0,8E-16 \text{ m}^2$. Cette différence est significative quand $0 \leq S_l \leq 0.5$ (c.à.d. quand il y a une discontinuité entre les molécules d'eau dans le matériau et quand les pores avec de petits diamètres (mésopore et micropore) commencent à se vider de leur eau (remplis d'air)). Alors, la faible perméabilité du béton B40 qui est gouvernée par sa porosité ouverte est due à des paramètres de formulation, principalement à son rapport E/C relativement faible ($E/C_{(B40)} = 0.45$), en comparaison avec ceux des autres bétons ($E/C_{(B35)} = 0.5$ et $E/C_{(B30)} = 0.6$).

Par ailleurs, la taille et le volume des granulats sont des facteurs importants qui peuvent influencer la perméabilité du béton (pour le B40, le rapport G/S est égal à 1.57 et pour les autres B35 et B30 il est égal à 1.68). C'est la zone de transition inter-faciale (l'interface pâte-granulats) appelée aussi « l'auréole de transition » qui participe à l'augmentation de la perméabilité au gaz d'un béton, car elle représente des zones poreuses préférentielles pour le passage du gaz. Tant du point de vue mécanique que du point de vue de la durabilité ou de

la perméabilité, ces zones constituent les « maillons faibles » du matériau [BUIL 92]. De plus, la taille (le diamètre) du granulat constitue un facteur qui peut influencer le volume de cette zone interfaciale (ITZ), car plus le diamètre du granulat est grand, plus l'épaisseur de la zone de transition est importante. Les bétons B30 et B35 contiennent une quantité beaucoup plus importante de gravier 16/25 mm par rapport au béton B40 (cf. Tab III-4). Ce dernier peut donc avoir une zone de transition relativement réduite par rapport aux autres bétons. Par ailleurs, la correction granulométrique du sable a tendance à améliorer la compacité du béton par la diminution de sa porosité ouverte, ce qui peut finalement réduire la perméabilité au gaz du béton B40.

Pourtant les bétons B35 et B30 sont formulés avec les mêmes quantités d'agrégats ; mais les résultats présentés sur la Fig IV-23 montrent qu'il est difficile, voir même impossible, d'établir une même loi logarithmique pour le calcul de leurs perméabilités intrinsèques en fonction de S_t , car ils sont formulés avec des rapports E/C différents (0.5 et 0.6). Donc, chaque béton (chaque structure poreuse) est caractérisé par une fonction logarithmique pour le calcul de sa perméabilité intrinsèque au gaz en fonction de son degré de saturation.

IV.6.2. Influence du rapport E/C sur la microstructure du béton

Plus le degré de saturation d'un béton est élevé, plus la perméabilité au gaz mesurée est faible. Ces constatations sont liées à la taille des pores accessibles : les macropores sont vidangés les premiers et les micropores les derniers lors d'un séchage [BARO 94]. Dans ce paragraphe, les structures poreuses des bétons B30, B35 et B40 ont été caractérisées à l'aide des essais de porométrie par intrusion de mercure. L'intrusion volumique cumulative du mercure et la distribution des tailles des pores pour les trois bétons sont présentées respectivement sur les Figs. IV-24 et IV-25. Le diamètre critique, qui correspond au maximum de porosité, est donné selon la distribution des tailles de pores (cf. Fig. IV-25).

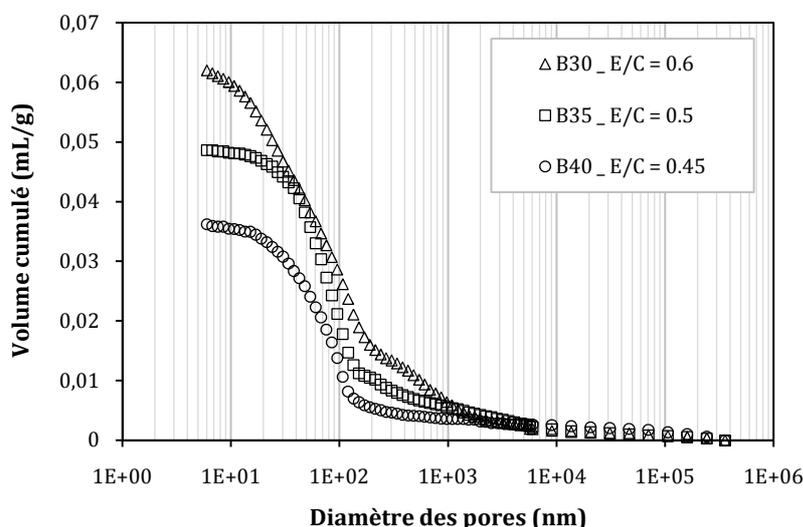


Fig. IV-24. Volume cumulé d'intrusion du mercure dans les bétons B30, B35 et B40.

Le volume cumulé d'intrusion du mercure dans l'échantillon de béton B30 avec un rapport $E/C = 0.6$ est supérieur au volume cumulé de mercure dans le cas du béton B35 dont le rapport $E/C = 0.5$ et encore plus important que celui utilisé dans le cas du béton B40 avec un rapport $E/C = 0.45$ (cf. Fig. IV-24). Ce qui indique que le volume des pores dans le béton B30 est supérieur aux bétons B35 et B45.

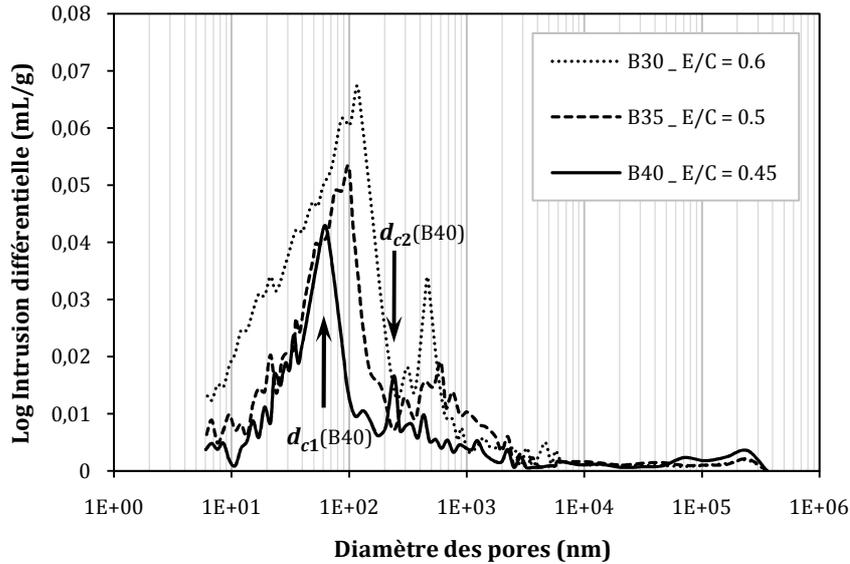


Fig. IV-25. Distribution de la taille des pores pour les bétons B30, B35 et B40 et la détermination des diamètres critiques d_{c1} et d_{c2} pour une distribution bimodale (cas de béton B40).

La **Fig. IV-25** montre que le diamètre critique d_{c1} des pores fins et sa proportion augmente avec le rapport E/C . Pour les trois bétons étudiés : $d_{c1}(B40) = 62$ nm, $d_{c1}(B35) = 99$ nm et $d_{c1}(B30) = 117$ nm. Ces résultats concernant la taille du pic correspondant au diamètre d_{c1} et son déplacement en fonction du rapport E/C sont en accord avec les études réalisées par d'autres chercheurs [COOK 99], [GALL 01], [CARÉ 11].

Dans les matériaux à E/C modéré (bétons ordinaires ($E/C \geq 0.4$)), on atteint à court terme un fort degré d'hydratation et les conditions hydriques et d'accessibilité sont telles que les produits d'hydratation peuvent aisément atteindre le cœur des grains de ciment [BARO 01]. On met en évidence un seuil pour $E/C \approx 0.4$ (seuil que l'on trouve dans la littérature) correspondant clairement à la valeur limite pour assurer une hydratation complète des grains de ciment [BARO 08].

Les deux diamètres critiques déterminés dans le cas du béton B40 sont illustrés sur la **Fig. IV-25**. Par ailleurs, l'utilisation d'un sable grossier (sable concassé 0/4 mm) tend à modifier les caractéristiques du réseau poreux à cause de l'auréole de transition ou interface pâte-granulats qui représente une zone poreuse autour de la phase granulat. Dans cette zone de transition, la pâte de ciment présente une cohésion plus faible, due à un excès local d'eau, car au moment du gâchage, un film liquide s'adsorbe sur la face du granulat. Les porosités totales Φ_{Hg} (en %) et les diamètres critiques (en nm) des bétons sont données dans le tableau suivant (cf. **Tab. IV-1**).

Tab. IV-1. Caractéristiques microstructurales (Φ_{Hg} : Porosité au mercure total (%), d_{c1} et d_{c2} : Diamètres critiques (nm)).

	Φ_{Hg} (%)	d_{c1} (nm)	d_{c2} (nm)
B30	13.68	117	461
B35	11.08	99	600
B40	8.52	62	241

La microstructure du béton B30 indique qu'il a une grande proportion de pores ayant un diamètre critique d_{c2} centré autour de 450 nm (cf. Fig. IV-25). Ces pores de grand diamètre constituent un chemin préférentiel pour les transferts, d'une part, lors du pré-conditionnement et, d'autre part, lors de l'injection du gaz au cours de la mesure de perméabilité.

Les diamètres critiques d_{c2} des bétons B30 et B35 s'insèrent entre 450 nm et 600 nm. Par contre, le béton B40 présente un diamètre critique (d_{c2}) centré autour de 250 nm. Plusieurs paramètres liés aux constituants et à la formulation sont à l'origine de ces différences. En effet, la proportion de cette catégorie de porosité (qui correspond au diamètre d_{c2}) devient plus importante quand le sable est plus grossier [HERV 10]. L'épaisseur de l'auréole de transition augmente avec la taille du granulat ; mais reste toujours inférieure à 50 μm [MASO 80]. Donc, la structure capillaire des pores dans un béton peut être modifiée non seulement par le rapport E/C ; mais aussi par la phase granulats (taille et volume). Ce résultat est en accord avec les résultats de plusieurs travaux de recherche déjà publiés [BENT 00].

IV.6.3. Influence du rapport E/C sur la perméabilité relative au gaz

La Fig. IV-26 présente une superposition des valeurs de K_{rg} des bétons B30, B35 et B40 en fonction de leurs degrés de saturation (déjà présentées plus haut en section § IV. 4).

Les résultats obtenus à partir de cette étude comparative montrent que l'évolution de la perméabilité relative au gaz des trois bétons étudiés en fonction de la saturation est presque identique. En effet, ce résultat est obtenu car les bétons comparés dans ce paragraphe sont des BO avec des rapports E/C rapprochés. On pense, en revanche que le comportement expérimental d'un béton de très faible porosité (un BHP par exemple) pourra être clairement distingué. L'influence du rapport E/C n'est donc pas significative sur l'évolution de K_{rg} des bétons étudiés en fonction de leurs degrés de saturation. Une seule fonction polynomiale semble acceptable pour l'estimation de l'évolution de K_{rg} en fonction de S_l .

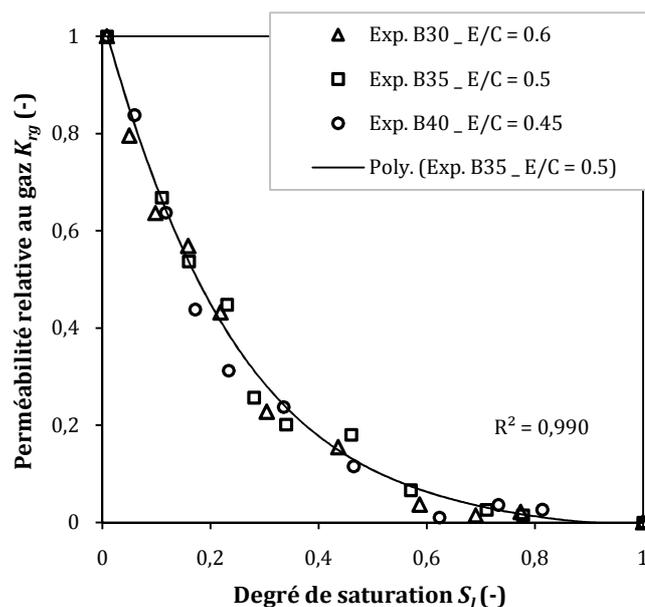


Fig. IV-26. Perméabilité relative au gaz des bétons B30, B35 et B40 en fonction de la saturation.

IV.6.4. Influence du rapport E/C sur l'évolution de la constante de Klinkenberg β

Le coefficient β , appelé aussi "constante de Klinkenberg", des échantillons des trois bétons (B30, B35 et B40), a été calculé en utilisant l'Eq. II-31. La Fig. IV-27 présente l'évolution de la constante de Klinkenberg pour les trois bétons en fonction de leurs degrés de saturation. Les résultats illustrés (cf. Fig. IV-27) sont des moyennes arithmétiques de trois valeurs de β calculées pour trois échantillons de 15 cm de diamètre à différents degrés de saturation.

Les résultats obtenus montrent, que plus la porosité ouverte du matériau est importante et plus la valeur de la constante de Klinkenberg est élevée. Donc, le rapport E/C influe sur l'évolution de la constante β en fonction du degré de saturation. Ce constat est plus évident quand l'état hydrique des échantillons testés se rapproche de l'état sec puisque β est une constante qui dépend principalement de la microstructure (réseau poreux) du matériau et du fluide percolant (viscosité dynamique). Au-delà d'un degré de saturation égal à 0,6, les valeurs de la constante β des trois bétons ne peuvent être distinguées. On peut dire ici que le réseau de la porosité effective (les pores à travers lesquels le gaz peut percoler) évolue avec le changement en degré de saturation. En effet, la perméabilité intrinsèque (K_{int}) a été toujours dépendante seulement du réseau poreux du matériau ; mais en réalité elle dépend uniquement de la partie des pores séchés qui permet le passage du gaz sous pression. On peut alors conclure que la croissance de la valeur de β avec l'augmentation de K_{app} (cf. § IV.2.1 et § IV.2.2) est un second facteur qui maintient la tendance de la variation de K_{int} des trois bétons lorsque les pores commencent à devenir vides et interconnectés ($0 \leq S_l \leq 0,5$).

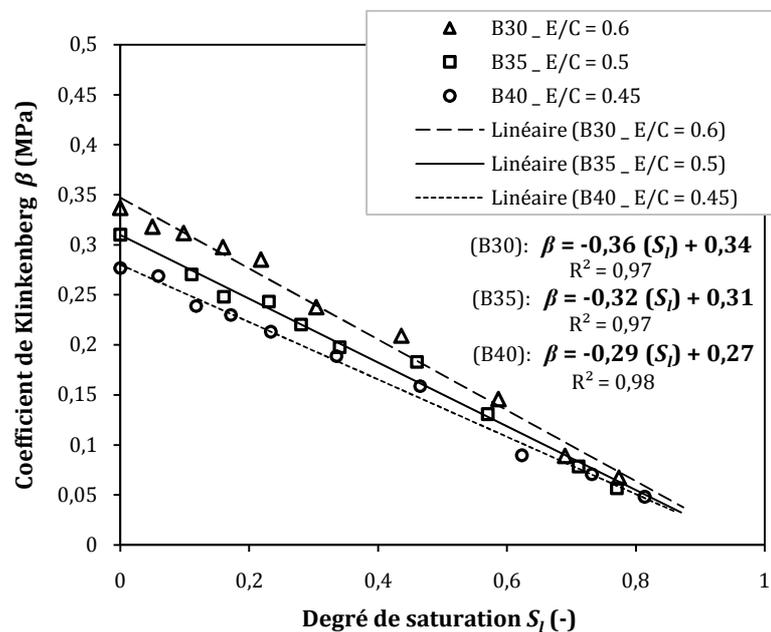


Fig. IV-27. Évolution de la constante de Klinkenberg β en fonction de degré de saturation.

La Fig. IV-27 montre aussi que l'évolution des valeurs de la constante β , pour les trois bétons, représente une fonction linéaire avec le degré de saturation du matériau. Ce coefficient β augmente quand le degré de saturation en eau diminue. Des courbes de tendances linéaires sont présentées sur cette figure avec de très bons coefficients de régression R^2 (par exemple R^2 obtenu dans le cas du béton B40 est égal à 0,98).

IV.6.5. Influence du rapport E/C sur la proportion de l'écoulement moléculaire pendant l'essai de perméabilité au gaz

La contribution de l'écoulement moléculaire dans l'écoulement total du gaz nitrogène, pendant l'essai de perméabilité Cembureau, a été déterminée à l'aide de l'Eq. (IV-6) pour les trois bétons comparés (B30, B35 et B40). L'évolution de l'écoulement non-visqueux (moléculaire) en fonction de la saturation pour les trois bétons à base de différents rapports E/C est présentée sur la Fig. IV-28. Les résultats présentés correspondent seulement aux échantillons testés à 3 bars de pression appliquée sur une des surfaces planes. Les valeurs présentées sont des moyennes arithmétiques de trois valeurs obtenues par le test de trois échantillons pour chaque béton et pour chaque degré de saturation.

Les résultats montrent que plus le rapport E/C est élevée et plus la contribution de l'écoulement non-visqueux croît. Cela ne peut être expliqué que par l'augmentation de la porosité ouverte du béton due à une augmentation du rapport E/C . À l'état complètement sec, la contribution de $Q_{moléculaire}$ pour les bétons B40, B35 et B30 est égale respectivement à 52,1 %, 55,2 % et 57,3 % de l'écoulement total du nitrogène. Par ailleurs, puisque le béton à des degrés de saturation relativement élevés ($S_l > 0.6$) présente des valeurs de perméabilité au gaz très faibles ; alors les valeurs de la contribution de l'écoulement non-visqueux des trois bétons, ne peuvent être distinguées. C'est à cause d'une continuité entre les molécules d'eau dans le réseau poreux du matériau que le passage du gaz est empêché et donc la contribution de l'écoulement moléculaire est moins importante dans cette gamme de S_l . Pour un même béton, l'évolution de cette contribution peut devenir même invariable en fonction des degrés de saturation élevés (quand $S_l \geq 0.8$) (cf. Fig. IV-28).

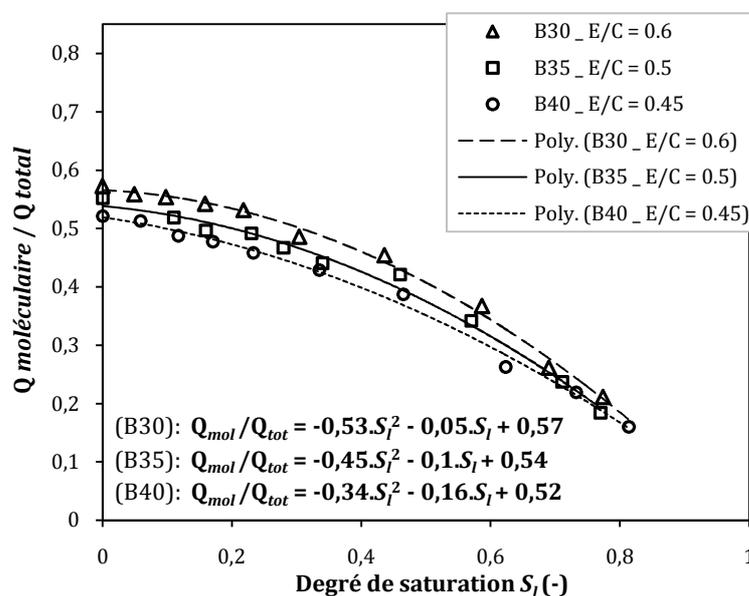


Fig. IV-28. Évolution de la contribution de l'écoulement moléculaire du gaz à travers le béton en fonction de son degré de saturation.

L'évolution de l'écoulement moléculaire dans l'écoulement total du nitrogène en fonction du degré de saturation peut être représentée par une régression polynomiale d'ordre 2. Des courbes de tendance polynomiale des données expérimentales obtenues avec les bétons B30, B35 et B40 sont aussi présentées sur la Fig. IV-28 avec des coefficients de régressions $R^2 > 0.99$.

IV.7. Influence de la classe de résistance du ciment sur la perméabilité du béton

Les deux bétons B32 et B35 comparés dans ce paragraphe sont de la même composition granulaire et de même rapport E/C ; mais fabriqués à base de deux ciments de classes de résistance différentes (CEM II/A 32,5 et CEM II/A 42,5). La Fig. IV-29 présente l'évolution de la perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation des deux bétons.

Les résultats montrent que le béton à base du ciment de classe de résistance 32,5 représente des perméabilités intrinsèques relativement élevées par rapport à celles obtenues avec le béton à base du ciment de classe 42,5 (cf. Fig. IV-29). Cela est observé principalement quand le taux de saturation du matériau est inférieur à 50 % ($S_l < 0,5$). À l'état complètement sec, le B32 (CEM II/A 32,5) a une perméabilité intrinsèque de $3,4E-16 \text{ m}^2$ pendant que le B35 (CEM II/A 42,5) a une valeur de K_{int} égale à $1,9E-16 \text{ m}^2$. Cette légère différence (K_{int} de même ordre de grandeur) entre les perméabilités des deux bétons ne peut être expliquée que par la légère différence entre les valeurs de leur porosité accessible à l'eau ($\phi_{\text{Eau}}(\text{B32}) = 14,7 \%$ et $\phi_{\text{Eau}}(\text{B35}) = 13,9 \%$).

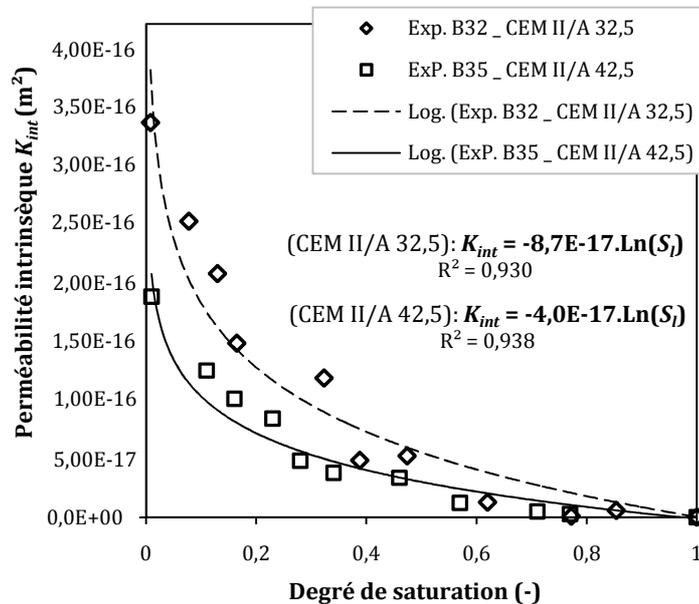


Fig. IV-29. Évolution de la perméabilité intrinsèque des bétons B32 et B35 en fonction de leurs degrés de saturation.

La Fig. IV-29 montre qu'à des degrés de saturation élevés ($S_l \geq 0,6$), on ne peut distinguer entre les résultats de K_{int} des deux bétons qui deviennent très faibles. Ceci a été aussi le cas pour tous les bétons testés décrits plus haut dans cette étude. Comme il a été démontré ci-dessus avec d'autres BO, les résultats expérimentaux de K_{int} en fonction de S_l peuvent être estimés correctement en utilisant une fonction logarithmique \ln , avec $R^2 > 0,9$. À partir des régressions logarithmiques illustrées sur la Fig. IV-29, nous constatons encore une fois qu'il est difficile d'établir une même loi logarithmique pour le calcul de K_{int} en fonction de S_l de deux bétons ordinaires de même formulation (même composition des granulats et même rapport E/C); mais avec des porosités totales différentes. Cette légère différence de porosité est due aux caractéristiques physico-chimiques des ciments utilisés et principalement à la taille initiale des grains de ciment.

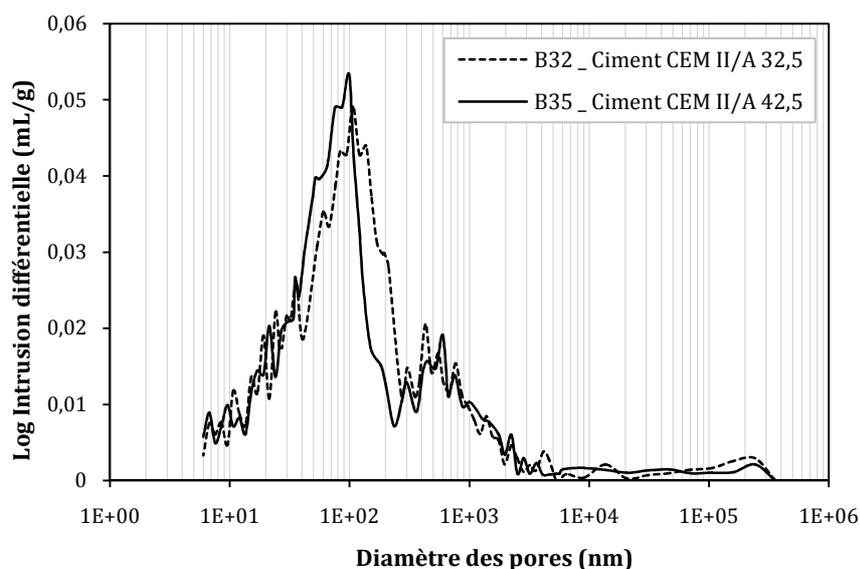


Fig. IV-30. Distribution de la taille des pores pour les bétons B32, B35.

La Fig. IV-30, présente les résultats d'une investigation de la microstructure des deux bétons dont la formulation est consignée sur le Tab. III-4. Au niveau des micropores, les bétons B35 et B32 comportent une forte proportion de pores dont le diamètre critique est centré autour de 100 nm ($d_{c1}(B35) = 99$ nm et $d_{c1}(B32) = 106$ nm) et le diamètre critique d_{c2} est centré autour d'une moyenne de 600 nm. Cependant, les résultats (cf. Fig. IV-30) montrent clairement que les pics représentant les deux diamètres d_{c1} et d_{c2} du béton B32 montrent une surface plus importante que celle obtenue dans le cas du béton B35. Ces constatations sont liées aux phénomènes physico-chimiques qui se produisent lors de l'hydratation de ces différents ciments (finesse Blaine différente, (cf. Tab. III-1). Ce qui va dans le sens des résultats obtenus, plus haut, pour la perméabilité (cf. Fig. IV-29).

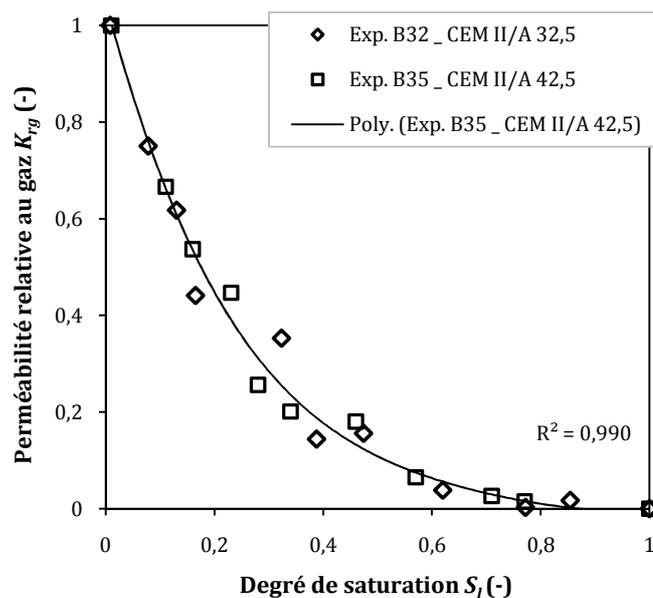


Fig. IV-31. Évolution de la perméabilité relative au gaz des bétons B32 et B35 en fonction de leurs degrés de saturation.

La Fig. IV-31 présente l'évolution de la perméabilité relative des bétons B32 et B35 en fonction de leurs degrés de saturation. Comme la seule différence entre les deux bétons (B32 et B35) n'est que la classe de résistance mécanique des ciments utilisés, alors les résultats de la perméabilité relative obtenus en fonction du degré de saturation montrent, que l'on peut distinguer très légèrement entre les valeurs expérimentales des deux bétons seulement dans l'intervalle: $0.3 < S_l < 0.6$).

IV.8. Influence de la taille de l'échantillon sur la perméabilité au gaz du béton

IV.8.1. Influence de la taille de l'échantillon sur l'évolution de K_{int} en fonction de S_l

Dans ce paragraphe, on étudie l'effet de la taille (diamètre) de l'échantillon sur les mesures de perméabilité au gaz du béton. Trois séries d'échantillons de différentes tailles : (15 x 5), (11 x 5) et (5 x 5) cm sont testés (cf. Fig. III-4). L'évolution de la perméabilité intrinsèque des échantillons de différents diamètres du béton B35 en fonction de leurs degrés de saturation est présentée sur la Fig. IV-32. Sur cette dernière, chaque point représente pour chaque degré de saturation, une moyenne arithmétique de trois mesures réalisées sur trois éprouvettes de même taille. Nous rappelons ici, que pour le préconditionnement de ces d'échantillons du béton B35 de différents diamètres, un séchage par palier à 80° C a été appliqué (cf. § III.9).

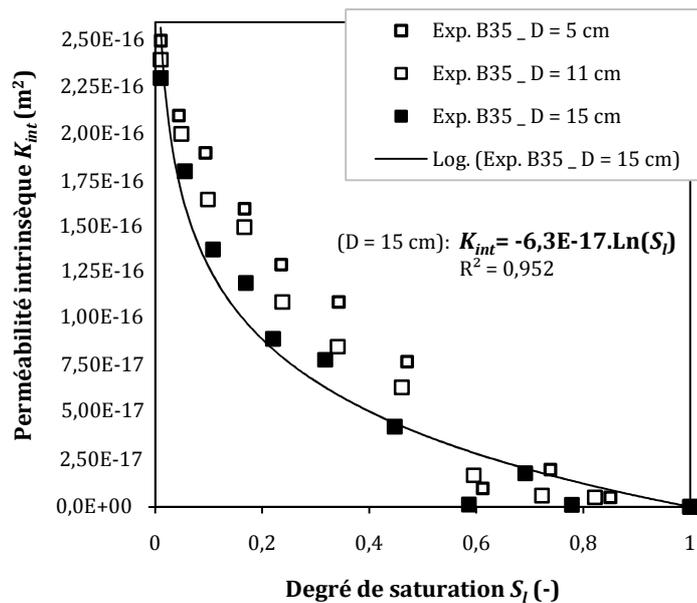


Fig. IV-32. Perméabilité intrinsèque du béton B35 en fonction du degré de saturation pour différentes tailles d'échantillons.

Les résultats illustrés sur la Fig. IV-32 montrent que la perméabilité intrinsèque des différents corps d'épreuve (échantillons de différents diamètres) est très influencée par le degré de saturation en eau du matériau, principalement dans un intervalle restreint de degré de saturation entre l'état sec et $S_l = 0.25$. Dans cet intervalle, K_{int} passe de l'ordre de $E^{-17} m^2$ à $E^{-16} m^2$. Le préconditionnement appliqué ici (cf. § III.9) a une influence sur l'état hydrique du matériau et donc sur la mesure de K_{int} .

En essayant d'aboutir à une loi de comportement du béton étudié pour le calcul de K_{int} en fonction du diamètre du corps d'épreuve testé, la Fig. IV-33 montre les résultats de la

perméabilité intrinsèque du béton B35, mesurée à l'état sec en fonction de l'inverse du rayon de l'échantillon testé. Ces résultats correspondent à des valeurs moyennes de K_{int} de trois échantillons pour chaque diamètre. D'après les résultats obtenus (cf. Fig. IV-33), nous constatons que la fonction entre la perméabilité intrinsèque du béton en fonction de l'inverse du rayon ($1/R$) des échantillons testés n'est pas linéaire et la relation donnée par la Fig. IV-33, correspondant à une courbe de tendance des résultats de K_{int} , obtenus à l'état sec, ne peut être considérée comme une fonction linéaire pour le calcul de K_{int} en fonction du rayon de l'échantillon cylindrique du béton, surtout avec un coefficient de régression $R^2 = 0.88$. À partir de cette relation de K_{int} , dans le cas d'un grand échantillon, voir même au niveau de la taille de la structure (quand $1/R$ tend vers 0), la valeur de la perméabilité intrinsèque du béton B35 tend vers une valeur de $2E-16 \text{ m}^2$.

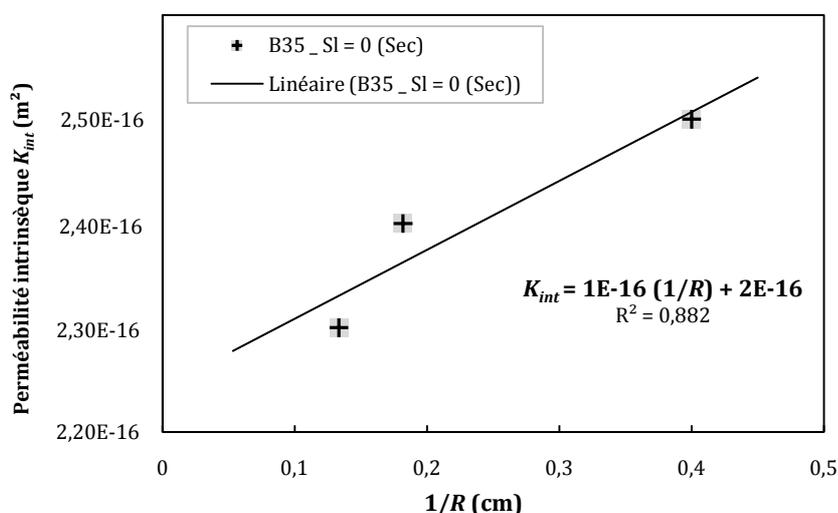


Fig. IV-33. Perméabilité intrinsèque en fonction de l'inverse du rayon de l'échantillon.

On a tenté de déterminer le rapport entre les perméabilités intrinsèques des échantillons de 5 cm et de 15 cm de diamètre par rapport à la valeur de K_{int} obtenue avec les échantillons du béton de 11 cm de diamètre à l'état sec et $S_l = 0.5$ (cf. Fig. IV-34).

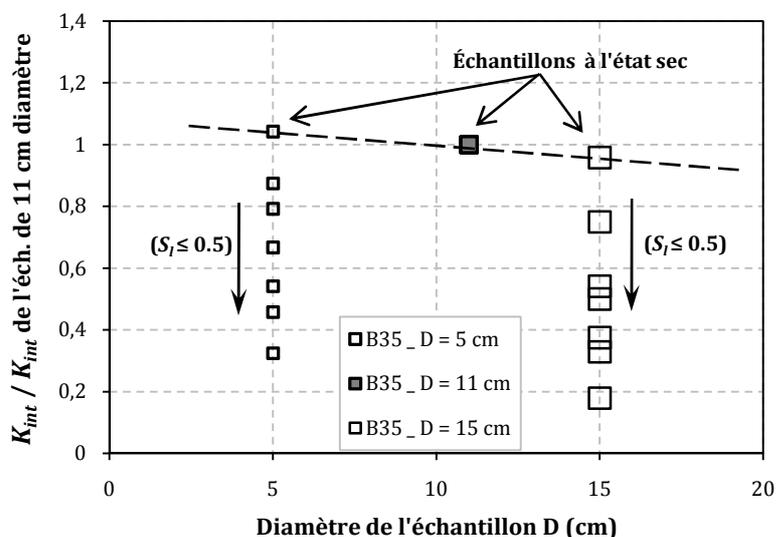


Fig. IV-34. Perméabilité intrinsèque en fonction du diamètre de l'échantillon testé.

On peut observer sur la **Fig. IV-34** que l'effet de la taille des corps d'épreuve sur les mesures de K_{int} est plus remarqué dans le cas des échantillons de petits diamètre ($D = 5$ cm) qui ont été obtenus par carottage par rapport aux échantillons de 15 cm de diamètre. Cela est plus remarqué quand le degré de saturation du matériau augmente. Une des explications de ce comportement peut être reliée au séchage, qui est plus destructif pour un échantillon de petite taille quand il subit un transfert de chaleur. D'autre part, ce comportement peut être local pour cette gamme de tailles correspondant à des tests de laboratoire et d'autres recherches avec d'autres tailles sont nécessaires afin de caractériser une loi sur l'effet de taille sur la mesure de la perméabilité du béton.

IV.8.2. Influence de la taille de l'échantillon sur la constante de Klinkenberg β

L'évolution de la constante de Klinkenberg (β) a été aussi étudiée en fonction du degré de saturation pour les trois séries d'échantillons de différents diamètres (15, 11 et 5 cm). Les résultats présentés sur la **Fig. IV-35** montrent qu'il est difficile de distinguer entre les valeurs de β des échantillons de différents diamètres du béton B35. Car c'est le même béton et la constante de Klinkenberg dépend seulement de la structure poreuse du matériau.

À partir de la régression linéaire illustrée sur la **Fig. IV-35** avec $R^2 \geq 0.97$, nous constatons que la taille du corps d'épreuve n'a pas d'influence sur l'évolution (le comportement linéaire) de la constante β en fonction du degré de saturation du matériau. Cette constante de Klinkenberg ne peut alors être influencée par le diamètre de l'échantillon et son évolution en fonction de la saturation peut être définie par une seule fonction linéaire pour l'ensemble des échantillons de différentes tailles.

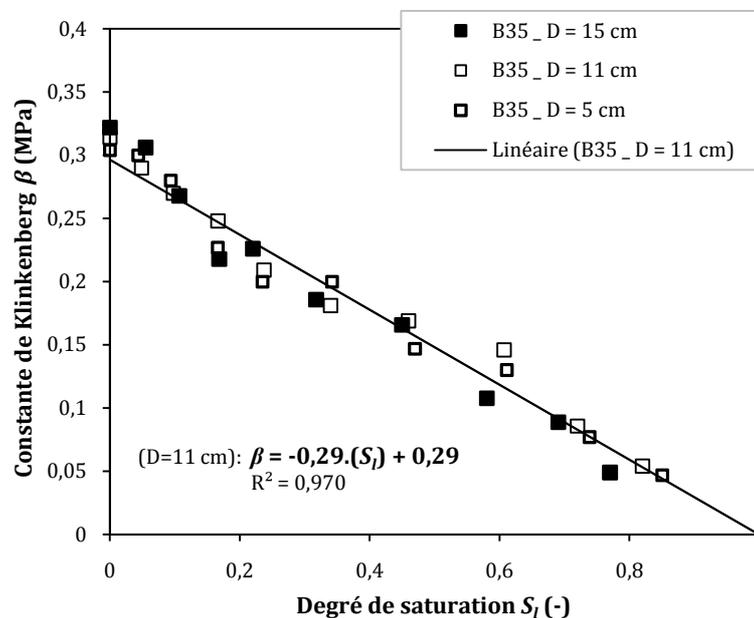


Fig. IV-35. Évolution de la constante de Klinkenberg β en fonction du degré de saturation pour différentes tailles d'échantillons.

IV.8.3. Influence de la taille de l'échantillon sur la perméabilité relative au gaz

L'évolution de la perméabilité relative au gaz des échantillons du béton B35 de différentes tailles en fonction de leurs degrés de saturation est présentée sur la **Fig. IV-36**.

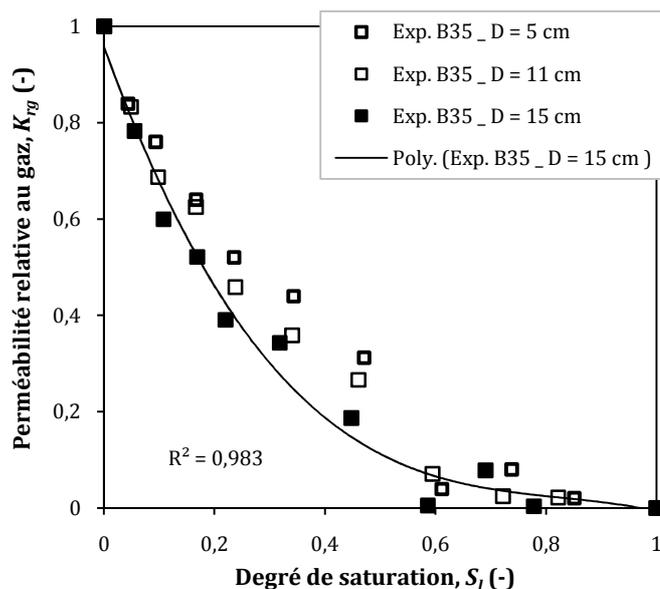


Fig. IV-36. Perméabilité relative au gaz du béton B35 en fonction du degré de saturation pour différentes tailles d'échantillons.

Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la perméabilité relative au gaz est présentée par des courbes concaves pour les trois séries d'échantillons de différentes tailles. Cette évolution peut être présentée correctement par une fonction polynomiale ou logarithmique (cf. Fig. IV-36). Les valeurs de K_{rg} des corps d'épreuve de 15 cm de diamètre sont légèrement inférieures à celles obtenues avec les corps d'épreuve de 11 et de 5 cm de diamètre. Ceci est plus remarquable dans une gamme intermédiaire de degré de saturation ($0.2 \leq S_l \leq 0.5$). Au-delà de 50 % de saturation ($S_l > 0.5$), il est difficile de distinguer entre les résultats de la perméabilité relative au gaz des deux séries d'échantillons du béton (c.à.d. quand les pores vides sont moins connectés dans le béton et qu'il y a plus de continuité entre les molécules d'eau dans le matériau).

IV.8.4. Effet de la taille sur les mesures de K_{int} des bétons B30, B32 et B40

L'influence de la taille des corps d'épreuve a été aussi étudiée pour les trois autres bétons B30, B32 et B40. Les Figs. IV-37, IV-39 et IV-41, montrent l'évolution de K_{int} en fonction de S_l pour les trois bétons et pour des échantillons de différents diamètres, ainsi que les Figs. IV-38, IV-40 et IV-42 montrent l'évolution de leurs perméabilités relatives en fonction de S_l . Notons ici que pour le béton B30 et B32, nous n'avons testés que deux diamètres différents (15 et 11 cm).

Les résultats présentés sur les Figs. IV-37 et IV-39 montrent que la variation entre les évolutions de K_{int} en fonction de la saturation des deux séries d'échantillons de différents diamètres ($D = 15$ et 11 cm), dans le cas des bétons B30 et B32, est très faiblement remarquée, principalement quand la saturation du matériau s'approche de l'état sec ($0 \leq S_l \leq 0.2$). Les résultats obtenus montrent que les valeurs de K_{int} des corps d'épreuve de 15 cm de diamètre sont très légèrement inférieures à celles obtenues avec les corps d'épreuve de 11 cm de diamètre, principalement dans un intervalle intermédiaire de S_l . À des degrés de saturation élevés, on ne peut distinguer entre les résultats de K_{int} des deux séries d'échantillons des deux bétons B30 et B32, dont certaines valeurs se superposent

presque. Les régressions logarithmiques présentées sur les Figs. IV-37 et IV-39 montrent que les fonctions, correspondant aux deux différentes tailles pour chaque béton, sont très rapprochées et presque superposées surtout quand il y a une interconnexion entre les pores vides dans le matériau ($S_l \leq 0.25$).

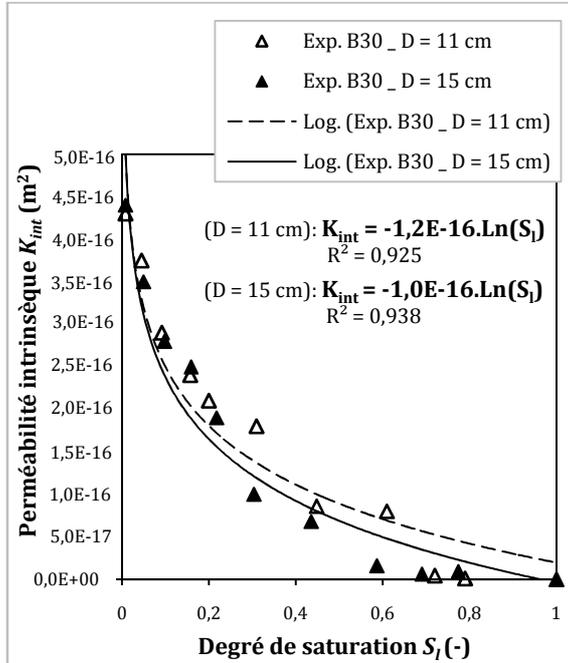


Fig. IV-37. Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B30.

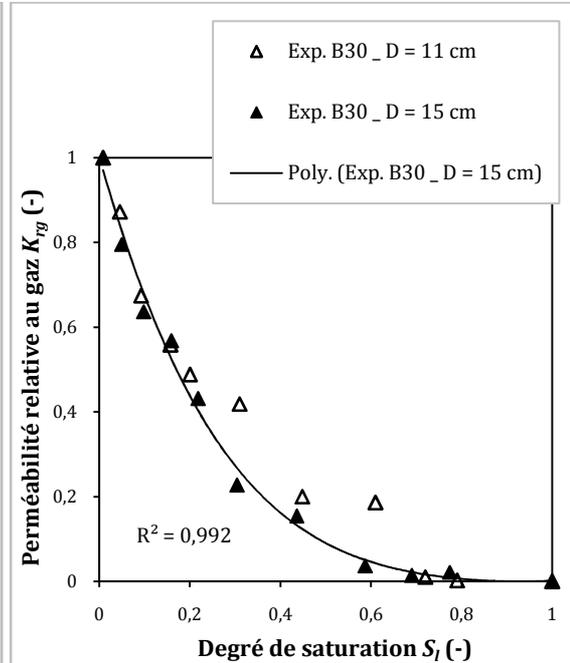


Fig. IV-38. Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B30.

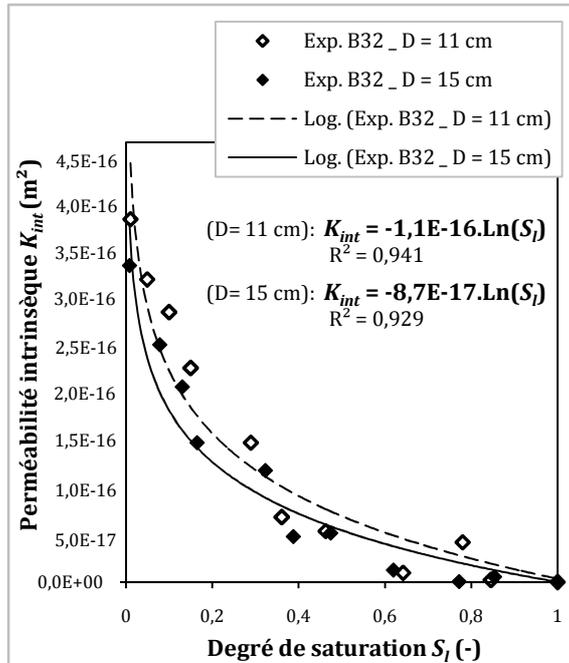


Fig. IV-39. Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B32.

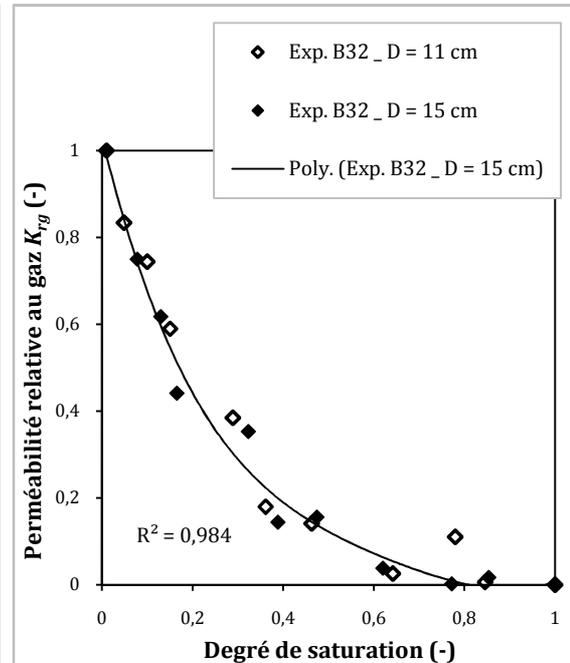


Fig. IV-40. Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B32.

On peut observer aussi à partir des Figs. IV-37, IV-39 et IV-41 que la variation entre les valeurs de K_{int} des échantillons de 15 cm de diamètre et celles des échantillons de 11 cm, pour les bétons B30 et B32, est moins significative par rapport aux résultats obtenus dans le cas du B40. Cela indique que les bétons avec des porosités ouvertes élevées, sont moins influencés par la taille (le diamètre) des corps d'épreuve testés, par rapport aux bétons avec des porosités relativement faibles tel que le béton B40 par exemple.

Les évolutions de la perméabilité relative au gaz des deux séries d'échantillons de différents diamètres des bétons B30 et B32 en fonction de la saturation sont presque identiques et ne peuvent être distinguées que légèrement, principalement dans un intervalle intermédiaire de S_l (cf. Figs. IV-38 et IV-40). En revanche, dans le cas des bétons B35 et B40, les évolutions de K_{rg} en fonction de la saturation, pour les échantillons de 11 et 5 cm de diamètre, sont présentées par des courbes concaves relativement élevées par rapport à celles obtenues dans le cas des échantillons de 15 cm de diamètre. L'influence de la taille de l'échantillon testé est donc moins significative ou même négligeable quand la porosité ouverte du béton est élevée.

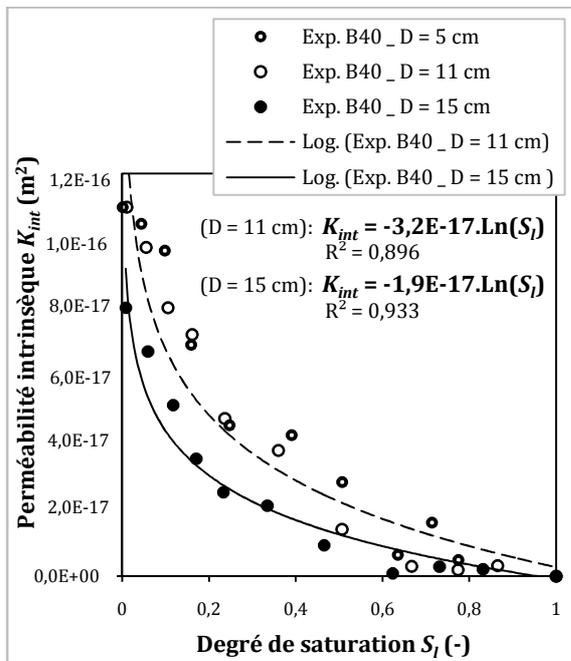


Fig. IV-41. Perméabilité intrinsèque en fonction de degré de saturation pour le béton B40

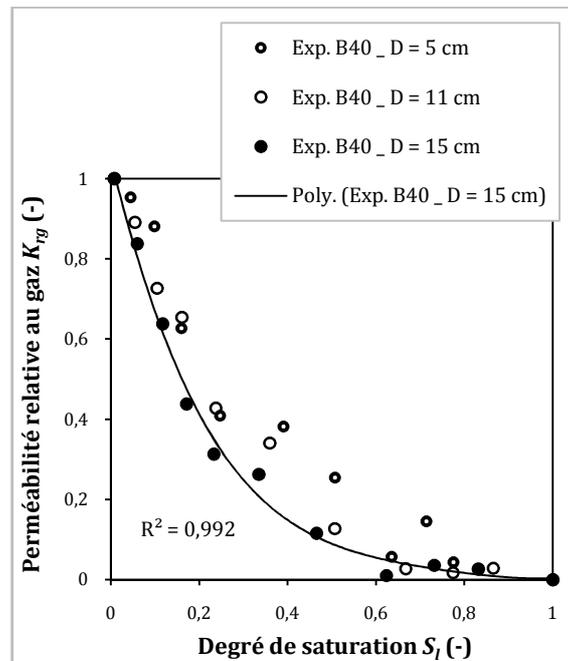


Fig. IV-42. Perméabilité relative au gaz en fonction de degré de saturation pour le béton B40

Nous constatons, à partir de ces résultats de K_{int} et de K_{rg} en fonction du degré de saturation des différents bétons, que l'influence de la taille de l'échantillon sur la mesure de perméabilité peut être remarquable quand la porosité connectée du béton est relativement faible. Ces constatations sont liées à l'homogénéité de la teneur en eau (de saturation) dans le matériau. Donc, plus la porosité du matériau est importante, plus sa teneur en eau est homogène. Ceci nous laisse penser que la teneur en eau des gros échantillons est moins homogène par rapport aux petits échantillons qui peuvent être plus influencés par un même séchage appliqué sur l'ensemble des échantillons de différents diamètres, ainsi que cet effet de taille des corps d'épreuve peut être plus remarqué dans le cas d'un BHP (béton de faible

porosité). Une importante perspective peut être mentionnée ici, c'est la vérification de l'homogénéité de l'état hydrique des échantillons de béton de différentes tailles qui peut être effectuée par la détermination des profils de teneurs en eau par gammadensimétrie.

IV.9. Variation de la perte en masse en fonction de la perméabilité relative

La perte en masse de tous les corps d'épreuve testés a été enregistrée dès le début de cette étude expérimentale. Elle a été calculée par différence de pesées et les résultats sont présentés sur les Figs. IV-43, IV-44, IV-45 et IV-46 en pourcentage en fonction de la perméabilité relative de chaque béton et pour chaque série d'échantillons de différentes tailles. Nous rappelons que ces résultats correspondent à des moyennes arithmétiques de trois valeurs mesurées sur trois échantillons après chaque échéance de séchage.

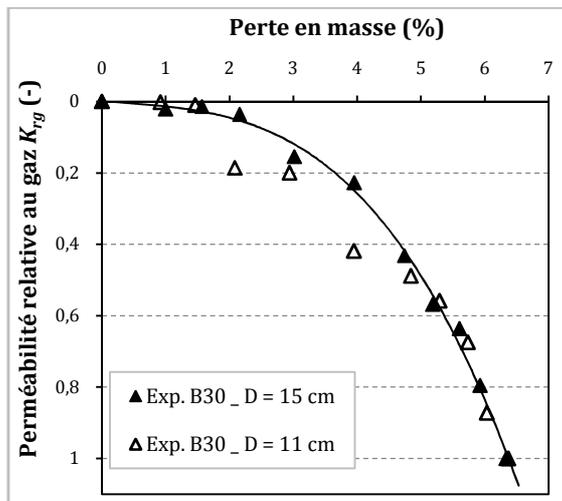


Fig. IV-43. Évolution de la perte en masse en fonction de K_{rg} du béton B30.

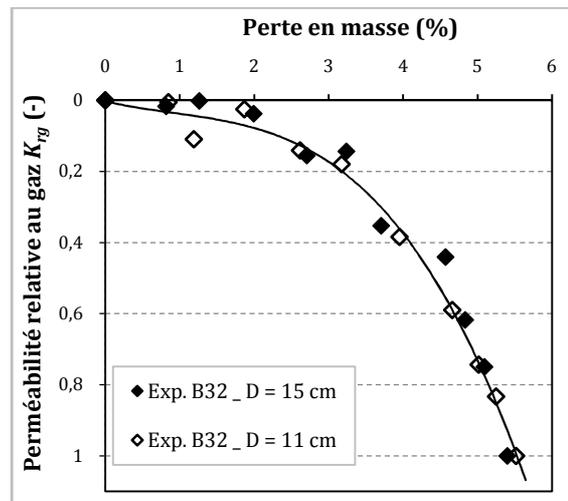


Fig. IV-44. Évolution de la perte en masse en fonction de K_{rg} du béton B32.

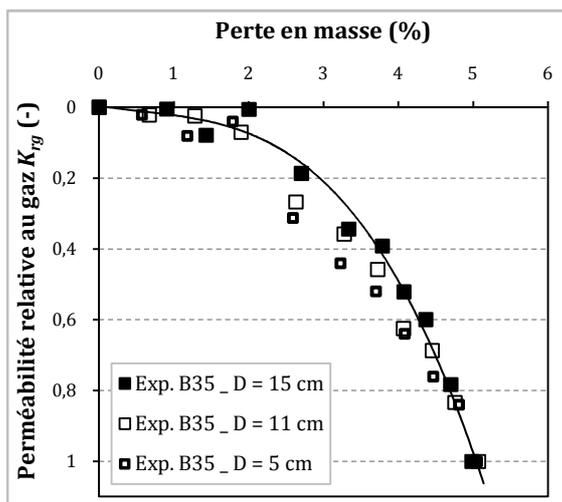


Fig. IV-45. Évolution de la perte en masse en fonction de K_{rg} du béton B35.

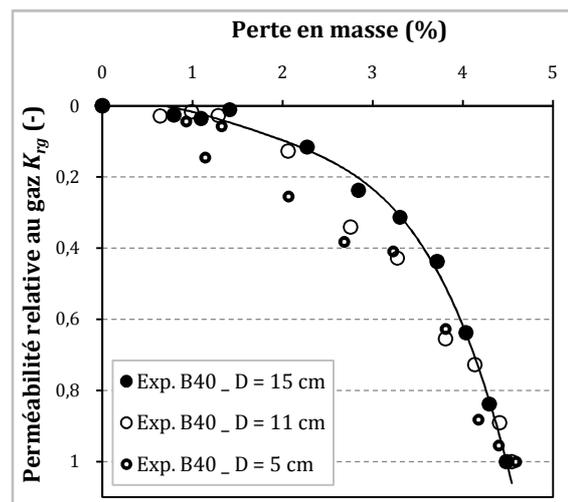


Fig. IV-46. Évolution de la perte en masse en fonction de K_{rg} du béton B40.

Les Figs. IV-43, IV-44, IV-45 et IV-46, montrent que le préconditionnement appliqué a permis de couvrir l'ensemble du domaine de saturation pour les bétons étudiés (BO). Les résultats

obtenus montrent que la perméabilité relative des quatre bétons augmente progressivement avec la perte en masse des différents corps d'épreuve (échantillons de différents diamètres). À l'état sec ($S_l = 0$), les pertes en masse (masse d'eau évaporée par un séchage) des bétons B30, B32, B35 et B40 sont égales respectivement à 6.4 %, 5.5 %, 5 % et 4.5 % de leur masse initiale à l'état complètement saturé. Par ailleurs, on peut remarquer qu'à des degrés de saturation élevés qui correspondent à des pertes en masse de moins de 3 %, les gros échantillons de diamètre important ($D = 15$ cm) de tous les bétons, perdent plus de masse (sèchent plus rapidement) que les petits échantillons à cause de leurs surfaces importantes. En-deçà de 3 % de perte en masse (qui correspond à $S_l \leq 0.5$), c'est-à-dire quand il y a une discontinuité entre les molécules d'eau liquide dans le béton, c'est les petits échantillons (avec des diamètres moins importants : 11 et 5 cm) qui commencent à perdre plus de masse par rapport aux échantillons de 15 cm. Ceci confirme que le séchage appliqué a influencé légèrement les échantillons de béton en fonction de leurs diamètres. Cela a été plus remarqué dans le cas des bétons B35 et B40 (cf. Figs. IV-45 et IV-46), c'est-à-dire quand le béton présente une porosité plus faible. Nous pensons, que ce phénomène aurait pu être beaucoup plus marqué si les surfaces latérales des échantillons du béton n'ont pas été recouvertes avec du papier aluminium lors du séchage et que l'eau aurait pu s'évaporer librement sur toutes les surfaces de l'échantillon.

Les résultats des pertes de masse des bétons ordinaires étudiés dans la gamme de saturation située entre 50 % et l'état sec, indiquent que pour un même degré de saturation, plus la taille de l'échantillon testé est grande et plus le pourcentage de ses pores vides sont relativement plus faible par rapport aux autres échantillons plus petits. Nous pouvons dire alors, que l'état hydrique de l'échantillon plus petit peut être plus homogène par rapport un gros échantillon malgré que ce dernier est plus représentatif. Cela peut donner une explication de la légère différence entre les perméabilités mesurées sur des échantillons de différents diamètres.

IV.10. Conclusions

La mesure de la perméabilité au gaz par la méthode CEMBUREAU a été réalisée sur les échantillons des quatre bétons étudiés. Les perméabilités au gaz des différents corps d'épreuve en béton ordinaire, obtenues à différentes pressions d'admission, permettent de calculer la perméabilité intrinsèque selon l'approche de Klinkenberg, qui est indépendante de la pression de mesure.

La perméabilité au gaz du béton dépend fortement de son degré de saturation. Elle augmente quand la saturation diminue. Son évolution représente une courbe concave en fonction du degré de saturation. Dans la gamme de S_l entre 0 et 0.25, la perméabilité relative au gaz des quatre BO étudiés, diminue fortement en fonction de la saturation jusqu'à environ 30 % de leurs perméabilités mesurées à l'état sec. Au-delà de $S_l = 0.6$, K_{rg} devient très faible et tend vers zéro.

Les résultats montrent que les courbes complètes des données expérimentales peuvent ainsi être estimées correctement à l'aide d'une fonction logarithmique " Ln ". Mais nous avons constaté qu'il est difficile d'établir une seule et même loi pour tous les bétons ordinaires étudiés. Donc, il est possible de caractériser pour chaque béton (chaque structure poreuse du matériau) une relation empirique entre la perméabilité intrinsèque au gaz et le degré de saturation.

Le préconditionnement appliqué a donc une grande influence sur la mesure de la perméabilité. En effet, le séchage à une température de 80° C par palier de 48 h, donne des valeurs de perméabilité relativement supérieures à celles obtenues dans le cas du séchage à une température de 60° C par palier de 24 h. Le choix de ces deux procédures de séchage a été fait dans le but d'éviter l'endommagement du matériau par des gradients thermiques et hydriques trop forts. Nous avons considéré que les échantillons testés issus de bétons relativement poreux présentent des teneurs en eau homogènes ; mais une vérification de cette homogénéité du cœur de l'échantillon jusqu'aux surfaces exposées au séchage, est nécessaire.

L'évolution de la perméabilité intrinsèque au gaz (K_{int}) en fonction de la saturation est influencée par le rapport E/C . L'augmentation du rapport E/C conduit à une augmentation de la porosité et par conséquent à l'augmentation de la perméabilité intrinsèque du matériau. L'évolution de K_{int} en fonction de la saturation du béton B32, à base du ciment CEM II/A 32,5 est légèrement supérieur à celle du béton B35 à base du ciment CEM II/A 42,5. Les évolutions de leurs perméabilités relatives au gaz en fonction de S_l sont presque identiques, car la distribution bimodale de la porosité de ces deux bétons est très rapprochée.

La perméabilité relative au gaz (K_{rg}) diminue lorsque le degré de saturation augmente. Elle montre une courbe concave en fonction de la saturation, qui peut être présentée correctement par une fonction logarithmique ou polynomiale. Les résultats obtenus montrent que la différence entre les perméabilités relatives au gaz des bétons étudiés, pour différents rapports E/C , est non remarquable. Cependant, les résultats obtenus montrent que l'évolution de K_{rg} en fonction de S_l du béton séché à 80° C est relativement supérieure de celle du béton séché à 60° C, principalement dans une gamme intermédiaire de S_l .

L'étude de l'effet de la taille de l'échantillon sur la mesure de perméabilité relative au gaz a montré que l'influence du diamètre de l'échantillon testé est moins significative ou même négligeable quand la porosité ouverte du béton est élevée. Ce qui peut être expliqué par le fait que suite à une même procédure de séchage (à une température de 60° C) appliquée sur l'ensemble des échantillons testés (de différentes tailles), un corps d'épreuve de petite taille peut être avec une teneur en eau plus homogène que dans un corps d'épreuve de grande taille. Cela est plus remarqué dans le cas d'un béton plus poreux dans lequel le transfert du gaz ainsi que l'évacuation de l'eau suite à un séchage est certainement plus facile que dans un béton de faible porosité. Nous pensons donc, pour ce mode de séchage suivi dans cette étude, que l'effet de la taille de l'échantillon sera plus remarquable dans le cas d'un BHP (un béton de faible porosité) que dans le cas d'un béton ordinaire.

Chapitre V. Mesure de la perméabilité relative à l'eau liquide.

Sommaire

V.1. Introduction.....	135
V.2. Débit d'eau en fonction de la saturation du béton.....	136
V.3. Évolution de la perméabilité intrinsèque à l'eau (K_I) en fonction de la saturation.....	138
V.4. Évolution de la perméabilité relative à l'eau en fonction de la saturation.....	140
V.5. Influence du rapport E/C sur la perméabilité intrinsèque à l'eau.....	142
V.6. Influence de la classe de résistance du ciment sur la perméabilité à l'eau du béton.....	143
V.7. Influence de la taille de l'échantillon sur la mesure de la perméabilité à l'eau.....	144
V.8. Évaluation de K_I par la mesure de la profondeur de pénétration de l'eau.....	146
V.9. Évaluation de la perméabilité par le modèle de Katz-Thompson II.....	148
V.10. Conclusions.....	153

Chapitre V. Mesure de la perméabilité relative à l'eau liquide.

V.1. Introduction

La perméabilité intrinsèque à l'eau liquide (K_l) est un paramètre clé qui décrit la vitesse de transport de la phase liquide. Elle peut être obtenue par plusieurs méthodes, telles des mesures directes [HEAR 91] (très délicates dans le cas des matériaux cimentaires qui sont faiblement perméables) ou les méthodes de Katz-Thompson [KATZ 86] basées sur les caractéristiques microstructurales du milieu et l'analyse inverse des cinétiques de perte de masse pendant le séchage [MAIN 99].

La perméabilité intrinsèque à l'eau liquide (K_l) des quatre bétons est alors déterminée dans la première partie et son évolution en fonction de S_l (de l'état sec à l'état complètement saturé) est discutée. Par conséquent, la perméabilité relative est donc déduite en fonction de la saturation pour chaque béton étudié. Dans la deuxième partie, on étudie l'influence des paramètres de formulation, telles que : le rapport E/C , la classe de résistance mécanique du ciment et la taille des échantillons sur les mesures de K_l . L'évaluation de la perméabilité intrinsèque à l'eau liquide (K_l) par la méthode de Katz-Thompson II, basée uniquement sur la distribution porale du matériau, fait l'objet de la troisième partie dans ce chapitre.

V.2. Débit d'eau en fonction de la saturation du béton

Dans ce paragraphe, les résultats des débits d'eau dans les bétons (partiellement saturés) étudiés sont présentés en fonction de la saturation. Nous rappelons que nous avons mesuré la perméabilité à l'eau du béton partiellement saturé à partir de la norme DIN EN 12390-8, relative à la mesure de la profondeur de la pénétration d'eau sous pression dans le béton à laquelle nous avons apporté quelques modifications (cf. § III.8). Un exemple pour le calcul de la perméabilité à l'eau est présentée en *Annexe D*.

Les histogrammes présentés sur les **Figs. V-1, V-2, V-3 et V-4** correspondent à la moyenne des débits d'eau mesurés chaque heure (en ml/h) pendant une durée de 6h en moyenne, pour les quatre bétons étudiés. Chaque histogramme correspond à la moyenne arithmétique des valeurs de débits, obtenues sur deux à trois échantillons testés pour chaque degré de saturation. Le débit total (débit final mesuré après 6 heures) est obtenu non seulement par une lecture directe sur le tube manométrique du perméamètre, mais il est aussi vérifié par différence massique suite aux pesées du même échantillon, avant et après l'essai de perméabilité.

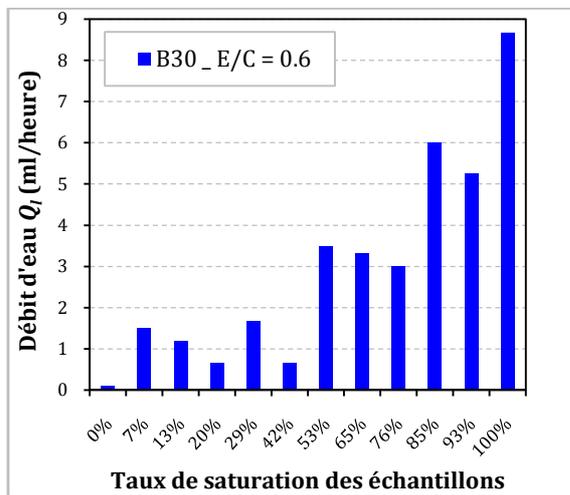


Fig. V-1. Débit d'eau en fonction du taux de saturation du béton B30.

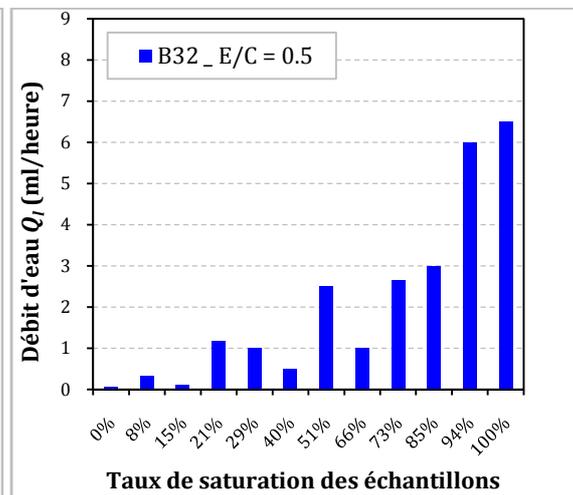


Fig. V-2. Débit d'eau en fonction du taux de saturation du béton B32.

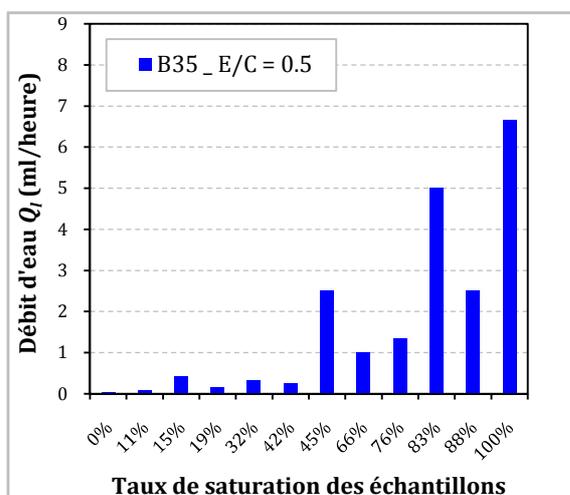


Fig. V-3. Débit d'eau en fonction du taux de saturation du béton B35.

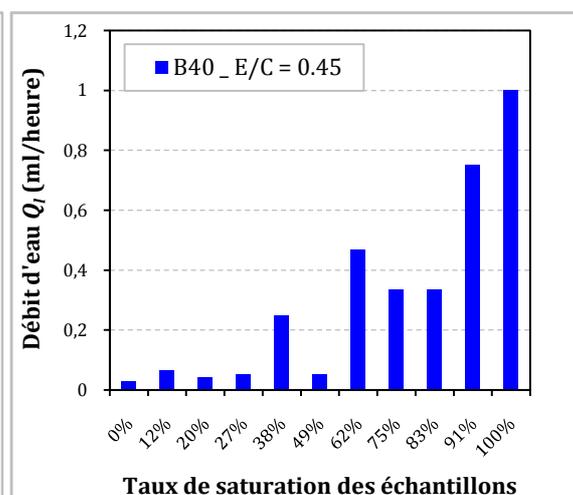


Fig. V-4. Débit d'eau en fonction du taux de saturation du béton B40.

Il est clairement observé à partir des **Figs. V-1, V-2, V-3 et V-4** que l'aptitude des bétons à se faire pénétrer par l'eau liquide est étroitement liée à S_l . Aussi, à l'exception de quelques mesures, les histogrammes fournissent généralement pour des degrés de saturation $S_l \leq 0.5$ un débit très faible ($Q_l \approx 0$). Dans ce domaine, la phase liquide se trouvant dans les pores est discontinue et aucun transport significatif (Darcéen) sous forme liquide ne peut par conséquent avoir lieu. En revanche, dans le domaine des S_l élevés, le transport liquide, dominé par l'écoulement de Darcy (cf. § I.3.5 et § II.3.4), est prépondérant.

La moyenne des débits enregistrés pendant 6 heures pour les bétons B30, B32, B35 et B40, à l'état saturé, sont respectivement égales à 8.66, 6.5, 6.66 et 1.0 ml/h.

A l'échelle d'un pore, lorsque l'eau liquide et le gaz coexistent, ces deux phases sont séparées par une interface courbe [BILL 03]. Les résultats obtenus (diminution de la perméabilité à l'eau du béton en fonction de son degré de saturation) sont donc expliqués par la relation liant la pression capillaire à la saturation liquide (cf. § I.3.4). La pression capillaire décroît d'une valeur maximale pouvant être infinie à une valeur minimale dite pression d'entrée d'air qui, lors d'un drainage est la pression capillaire au-delà de laquelle la saturation en eau liquide diminue effectivement. Dans le cas des matériaux peu perméables comme les bétons, quand la saturation en eau décroît, la pression capillaire devient trop élevée (cf. **Figs. I-18 et II-21**).

Il est important de noter que lors de la mesure de la perméabilité à l'eau du béton à l'état saturé, nous avons remarqués que le volume d'eau récupéré en fonction du temps n'est pas proportionnel au temps (cf. **Figs. V-5, V-6, V-7 et V-8**). Ce phénomène n'est normal que dans le cas d'un échantillon partiellement saturé, ce qui n'est pas le cas. En vérifiant la masse de l'échantillon, on constate qu'elle augmente après la mesure. On pense qu'il y a des pores qui ne peuvent pas être saturés à l'eau sous vide surtout quand la taille de l'échantillon est importante (15 x 5 cm), mais une pression d'injection de 3 bars aide au remplissage de ces pores.

Le gain en poids représentant la différence entre la masse de l'échantillon après la mesure de la perméabilité à l'eau ($m_{après}$) et la masse avant la mesure (m_{avant}) est présenté, pour chaque béton testé, sur le **Tab. V-1**.

Tab. V-1. Gain en poids des échantillons de béton soumis à l'essai de perméabilité sous l'eau.

Echantillon	B30	B32	B35	B40
$m_{après} - m_{avant}$ (g)	2.38	4.11	4.95	6.83

Nous constatons à partir des résultats indiqués sur le **Tab. V-1** que la méthode de la saturation à l'eau sous vide est plus efficace sur un béton d'une importante porosité accessible à l'eau tel que le béton B30 ($\Phi_{B30} = 15.2\%$) que sur un béton de faible porosité tel que le béton B40.

La saturation à l'eau des échantillons de béton ordinaire, malgré leurs porosités élevées, nécessite un temps d'injection sous pression de six heures (cf. § III.8.2).

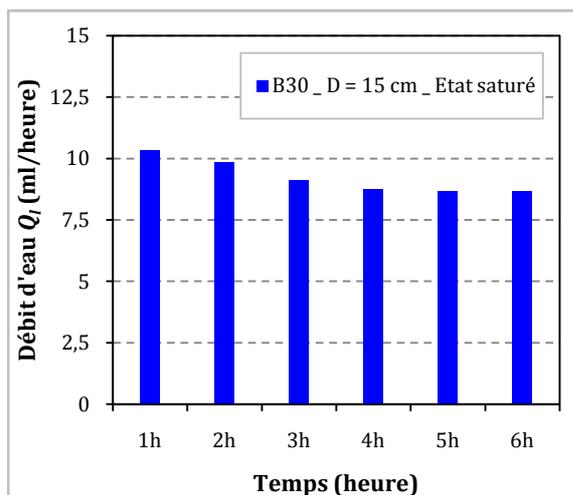


Fig. V-5. Perméabilité à l'eau du béton B30 à l'état saturé.

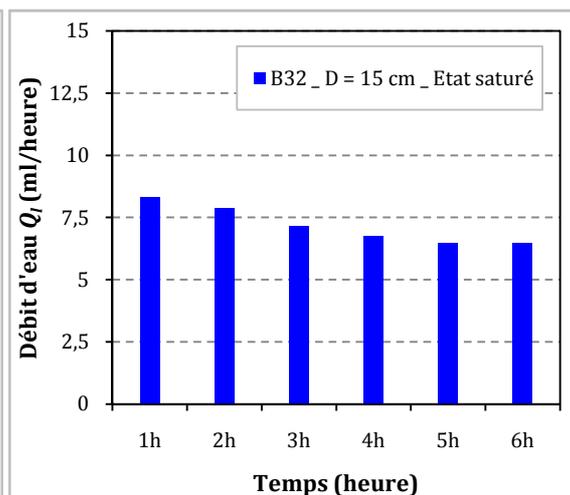


Fig. V-6. Perméabilité à l'eau du béton B32 à l'état saturé.

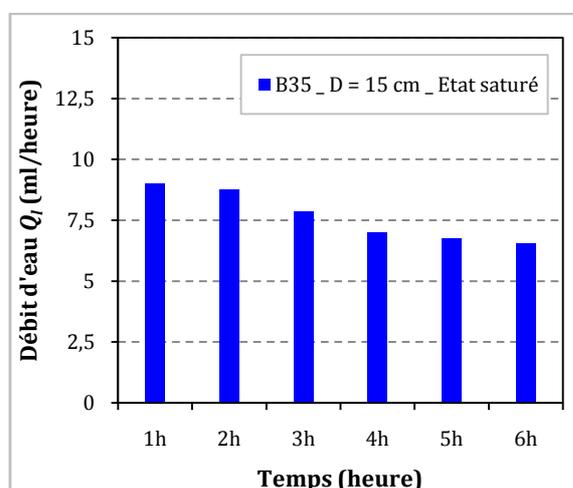


Fig. V-7. Perméabilité à l'eau du béton B35 à l'état saturé.

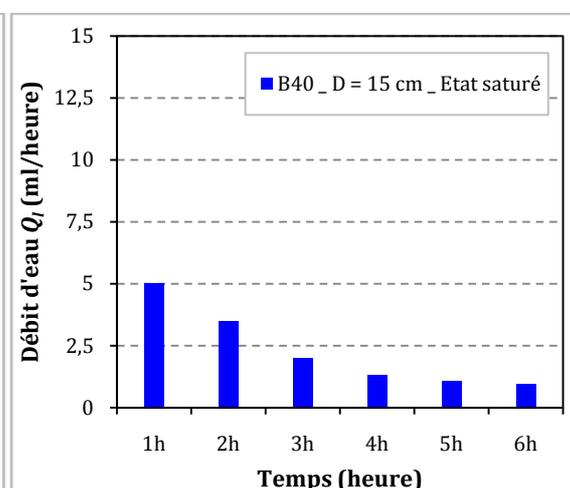


Fig. V-8. Perméabilité à l'eau du béton B40 à l'état saturé.

V.3. Évolution de la perméabilité intrinsèque à l'eau (K_l) en fonction de la saturation

Pour chaque béton, les résultats de l'évolution de la perméabilité à l'eau liquide (K_l) en fonction de la saturation (S_l) sont illustrés par les Figs. V-9, V-10, V-11 et V-12 dont les valeurs indiquées correspondent à une moyenne arithmétique de deux à trois valeurs de perméabilité obtenues pour chaque degré de saturation.

La perméabilité à l'eau des bétons B30, B32 et B35 à l'état complètement saturé est de l'ordre de $E-17 \text{ m}^2$ alors que leurs perméabilité intrinsèque au gaz mesurée à l'état sec est de l'ordre de $E-16 \text{ m}^2$ (cf. § IV.3). Elle est par contre de l'ordre de $E-18 \text{ m}^2$ pour le B40, pour K_{int} de l'ordre de $E-17 \text{ m}^2$. Donc, les perméabilités intrinsèques à l'eau des bétons ordinaires étudiés sont plus faibles d'un ordre de grandeur que leurs perméabilités intrinsèques au gaz. Cette sous-évaluation de la perméabilité à l'eau est due principalement à la réactivité du fluide vis-à-vis du milieu poreux (interaction entre l'eau et la matrice cimentaire), à la difficulté de mesurer des débits très faibles (cf. § II.2.2.6), et au phénomène d'obturation des pores par des particules en suspension pouvant ainsi induire cette réduction du flux d'eau qui traverse le béton, amenant à une sous-évaluation de K_l .

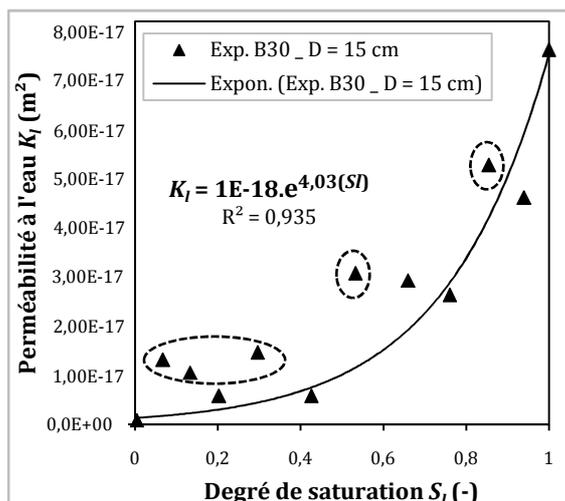


Fig. V-9. Perméabilité à l'eau du béton B30 en fonction de son degré de saturation.

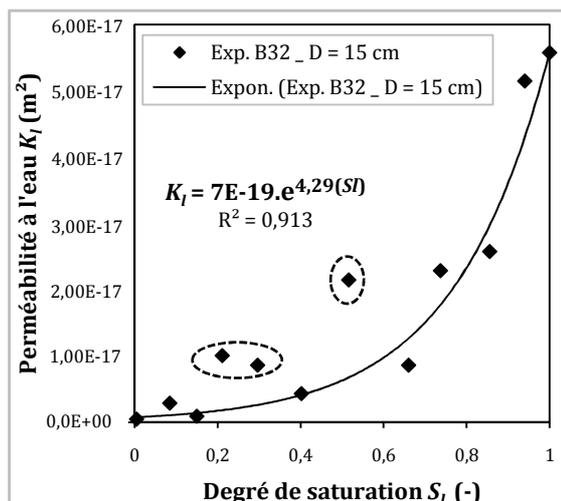


Fig. V-10. Perméabilité à l'eau du béton B32 en fonction de son degré de saturation.

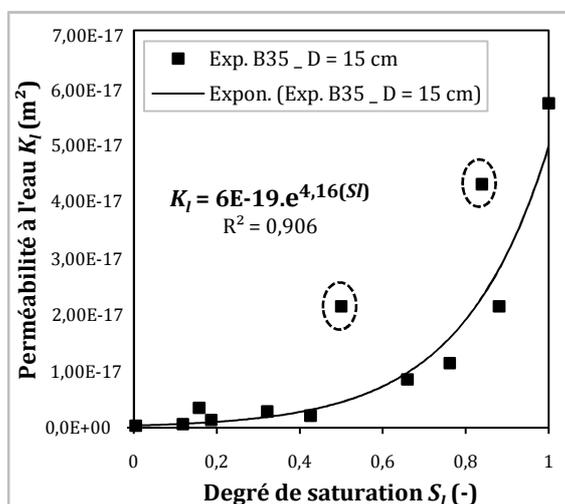


Fig. V-11. Perméabilité à l'eau du béton B35 en fonction de son degré de saturation.

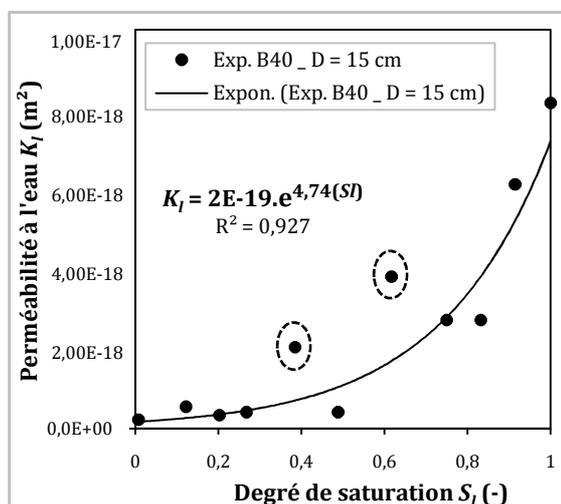


Fig. V-12. Perméabilité à l'eau du béton B40 en fonction de son degré de saturation.

À partir des **Figs. V-9, V-10, V-11 et V-12**, la perméabilité intrinsèque à l'eau liquide (théoriquement indépendante des phases saturantes) augmente quand l'état hydrique dans le matériau augmente aussi. Le coefficient K_l proportionnel au débit Q_l présente la même évolution pour $S_l \leq 0.5$. À cet intervalle les courbes fournissent des valeurs très faibles de K_l . D'autre part, dans le domaine des S_l élevés, la perméabilité à l'eau augmente considérablement avec le degré de saturation du matériau en indiquant une valeur maximale quand le matériau est complètement saturé. Ces variations de K_l peuvent s'expliquer par les mêmes raisons qui expliquent l'évolution du débit d'eau Q_l en fonction de S_l (cf. § V.2). En effet, dans le cas général de la diffusion hydrique, selon le matériau considéré et son état de saturation, un processus parmi deux peut être prépondérant ; soit la diffusion de la vapeur d'eau (transport diffusif) qui prédomine dans la gamme des faibles valeurs de S_l , soit le transport convectif (sous forme liquide) de l'eau liquide selon la loi de Darcy, régi par la perméabilité du milieu non saturé $K_l \cdot K_{rl}(S_l)$ qui est prépondérant dans la gamme des S_l élevés (cf. § I.3.5 et § II.3.4).

À partir des résultats obtenus, on ne constate que de légères différences entre les perméabilités à l'eau liquide des quatre bétons étudiés. En effet, pour B30, B32 et B35 dont le K_l à $S_l = 1$, sont respectivement de : $7.5E-17 \text{ m}^2$, $5.6E-17 \text{ m}^2$ et $5.7E-17 \text{ m}^2$. Pour le béton B40 elle est de $8.6E-18 \text{ m}^2$. Ceci confirme que l'influence des caractéristiques de la structure poreuse du matériau est moins significative sur la perméabilité à l'eau que sur la perméabilité au gaz (cf. § IV.3).

En effet, le transport de l'eau liquide est essentiellement visqueux, alors que l'écoulement de gaz à l'échelle des pores comporte deux composantes : une visqueuse et une de glissement. Il est rapporté dans la littérature [MAIN 99], [THIE 07], [BARO 07] que, même si l'effet de glissement est pris en compte, des écarts existent toujours entre les valeurs de perméabilité intrinsèque mesurée pour les liquides et pour les gaz. En effet, dans le cas du transport de l'eau liquide, il y a de fortes interactions entre les molécules d'eau et la matrice cimentaire qui s'ajoutent au transport Darcéen. De plus, les réseaux poreux impliqués dans le transport sont différents si le gaz ou l'eau migre dans le matériau. Par conséquent, une notion de perméabilité intrinsèque "unique" ne peut donc pas être appliquée dans le cas des matériaux cimentaires. Il convient ce faisant de distinguer les perméabilités intrinsèques à l'eau liquide ou au gaz [BARO 07b].

En négligeant certains points que nous considérons surévalués (points encerclés) sur les Figs. V-9, V-10, V-11 et V-12, on remarque pour tous les bétons, que les données expérimentales peuvent être estimées correctement par une fonction exponentielle. Il peut être observé aussi, à partir de ces courbes de tendances, qu'il est difficile d'établir une loi unique pour K_l en fonction de S_l pour tous les bétons ordinaires.

V.4. Évolution de la perméabilité relative à l'eau en fonction de la saturation

Comme pour la perméabilité relative au gaz, il est possible de déduire à partir des mesures de K_l à différents degrés de saturation, une courbe $K_{rl} = K_{rl}(S_l)$ pour chaque matériau testé où K_{rl} est la perméabilité relative à l'eau liquide. Elle s'obtient en divisant la valeur de la perméabilité calculée lors d'un essai sur un échantillon dont la saturation est répartie de manière homogène ($K_{l(S_l=x)}$) par la valeur de la perméabilité calculée dans un état complètement saturé ($K_{l(S_l=1)}$).

Nous rappelons qu'il était impossible de tester la perméabilité à l'eau d'un échantillon plusieurs fois (à différents degrés de saturation), à cause de la resaturation du matériau une fois l'essai de perméabilité terminé (cf. § III.9). Alors, pour chaque degré de saturation deux à trois échantillons du béton sont testés, dont les valeurs moyennes sont illustrées pour chaque degré de saturation sur les Figs. VI-13, VI-14, VI-15 et VI-16.

Les résultats obtenus montrent que la perméabilité relative à l'eau des bétons étudiés augmente avec le degré de saturation. Son évolution donne une courbe concave, avec une valeur maximale de K_{rl} quand le matériau est complètement saturé (à $S_l = 1$). Il est observé à partir des courbes obtenues que K_{rl} peut être corrélée avec le degré de saturation (S_l) du matériau. Une régression exponentielle des données expérimentales obtenues, est également représentée pour chaque béton sur les Figs. IV-13, IV-14, IV-15 et IV-16.

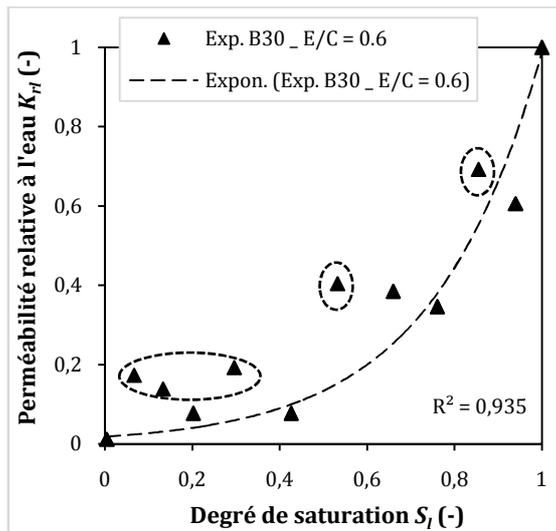


Fig. V-13. Perméabilité relative à l'eau liquide du béton B30

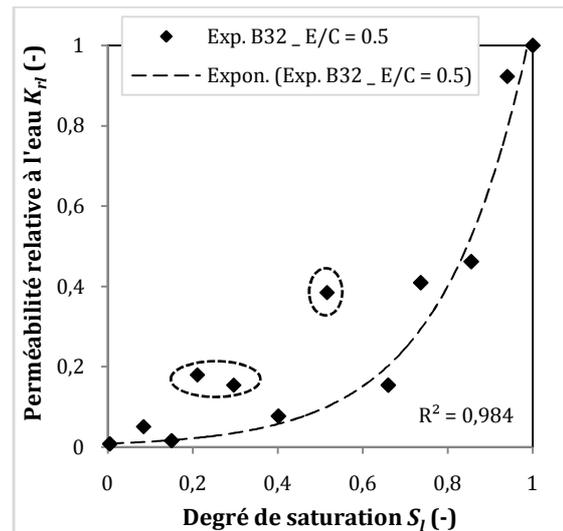


Fig. V-14. Perméabilité relative à l'eau liquide du béton B32

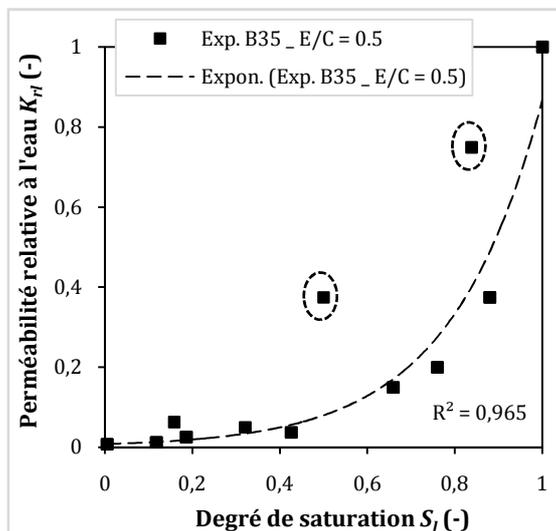


Fig. V-15. Perméabilité relative à l'eau liquide du béton B35

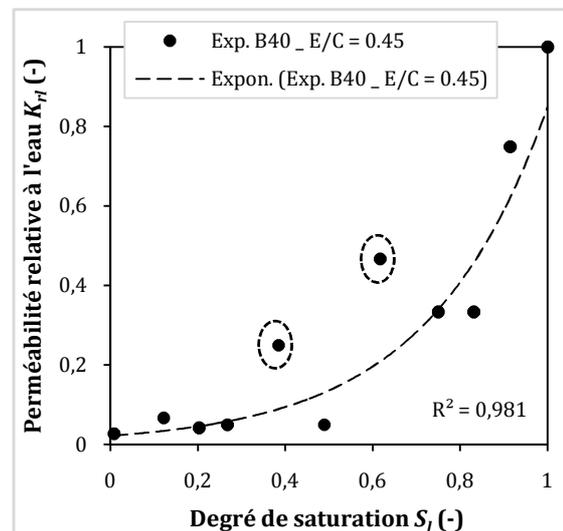


Fig. V-16. Perméabilité relative à l'eau liquide du béton B40

En négligeant certaines valeurs de K_{rl} (les points entourés de cercles qui correspondent à une surévaluation de K_l), dans un intervalle de variation du degré de saturation : $0 < S_l \leq 0.6$), la perméabilité relative à l'eau des bétons étudiés reste inférieure à 20 % de la valeur maximale obtenue à l'état complètement saturé (cf. Fig. IV-13). Ceci indique qu'au-delà d'un degré de saturation égal à 0.6, les molécules d'eau sont plus connectées dans le matériau, conduisant à une forte croissance de la perméabilité relative à l'eau liquide dans cet intervalle ($0.6 < S_l \leq 1$). Les résultats obtenus montrent aussi que cette augmentation de K_{rl} est plus remarquable quand la porosité du béton étudié est relativement élevée. Dans une gamme intermédiaire de S_l , la perméabilité relative à l'eau des quatre bétons est faible et elle tend vers des valeurs négligeables et quasiment nulle dans un intervalle de S_l faibles. (cf. Figs. IV-13, IV-14, IV-15 et IV-16). Dans ce domaine des S_l faibles, aucun écoulement Darcien ne peut se produire, et le transport dans le béton est gouverné seulement par la diffusion gazeuse (le transport diffusif de la vapeur d'eau) (cf. § I.3.5.1).

V.5. Influence du rapport E/C sur la perméabilité intrinsèque à l'eau

Dans ce paragraphe, les évolutions de la perméabilité intrinsèque à l'eau en fonction de S_l des trois bétons B30, B35 et B40 sont comparés. Les régressions exponentielles des données expérimentales obtenues sont illustrées pour chaque béton sur la Fig. V-17. Nous rappelons que certains points (entourés de cercles dans les figures précédentes) ont été négligés à cause de l'hétérogénéité du matériau et car ce n'est pas les mêmes échantillons testés à chaque degré de saturation.

On observe la même tendance de l'évolution de K_l en fonction de S_l pour les bétons B30 et B35 (Fig. V-17) ; cette tendance est beaucoup plus atténuée pour le B40. Le rapport E/C à l'origine de la distribution porale au sein des bétons est donc en relation directe avec le transport des fluides eau et gaz même dans le domaine des S_l relativement faibles. Les pores les plus petits, qui sont encore remplis d'eau lors de la saturation, contribuent moins à la perméabilité à l'eau dans le béton B40 que dans les bétons B35 et B30. Les résultats de la pométrie au mercure confirment aussi cette conclusion (cf. Fig. IV-25). En outre, nous constatons que l'influence du rapport E/C et par conséquent de la structure poreuse du matériau est moins significative sur sa perméabilité intrinsèque à l'eau que sur sa perméabilité intrinsèque au gaz (Fig. IV-23).

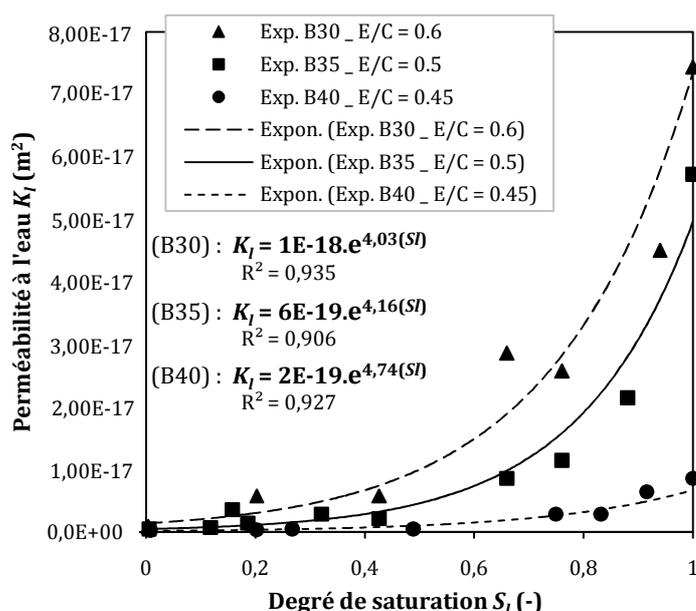


Fig. V-17. Évolution de la perméabilité à l'eau en fonction de S_l pour les bétons B30, B35 et B40.

Pour les trois bétons ordinaires, la perméabilité relative à l'eau (K_{rl}) en fonction de la saturation en eau donne une courbe concave (Fig. V-18). Baroghel-Bouny (2007) [BARO 07] trouve pour deux bétons ordinaires (M25 et BO) et un béton à haute performance (BH) la même tendance de l'évolution de K_{rl} en fonction de S_l (cf. Fig. II-29).

Malgré la différence notable du rapport E/C pour les bétons B30, B35 et B40, il est difficile de distinguer entre leurs perméabilités relatives (cf. Fig. V-18). Ce qui confirme l'influence négligeable de la structure poreuse des bétons ordinaires étudiés ($E/C > 0.4$) sur leurs perméabilités relatives à l'eau. Ce même résultat a été obtenu dans le cas des perméabilités relatives au gaz présentées dans le chapitre IV.

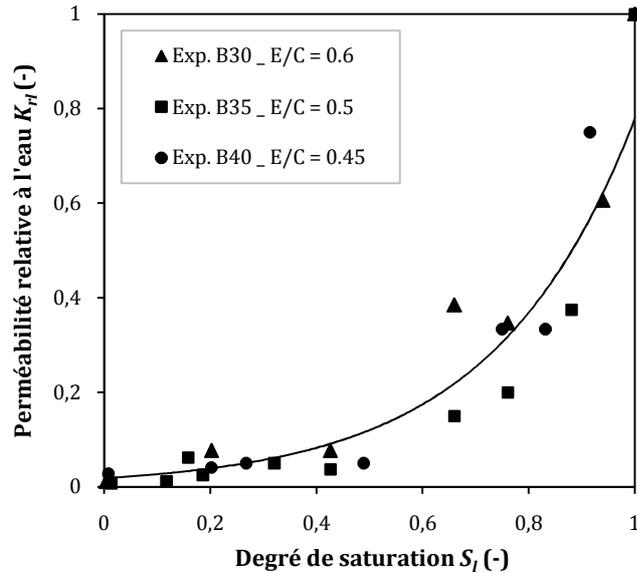


Fig. V-18. Perméabilité relative à l'eau liquide en fonction de S_f pour les bétons B30, B35 et B40.

V.6. Influence de la classe de résistance du ciment sur la perméabilité à l'eau du béton

La Fig. V-19 présente l'évolution de la perméabilité à l'eau de deux bétons : B32 et B35 à base de ciments de classes de résistances différentes CEM II/A 32,5 et CEM II/A 42,5 (cf. Tab. III-1). Notons que les deux bétons, lors des mesures de la perméabilité à l'eau ont le même âge et ont subies le même préconditionnement.

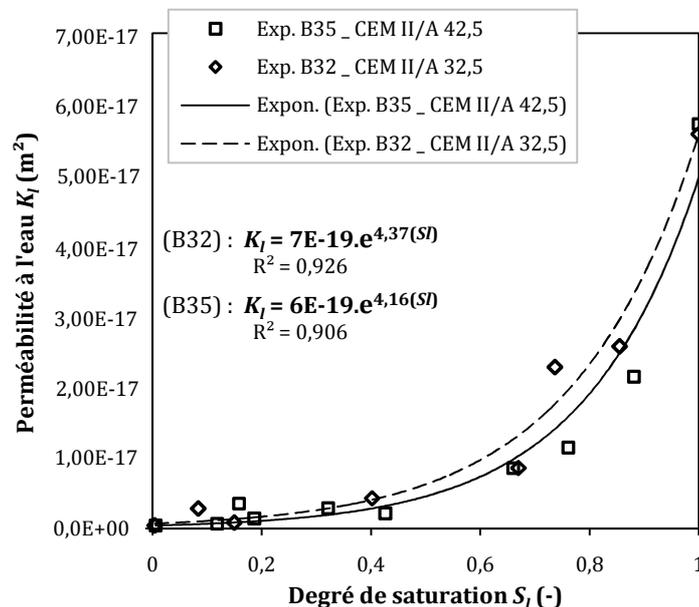


Fig. V-19. Évolution de la perméabilité à l'eau en fonction de S_f pour les bétons B32 et B35.

À partir des résultats illustrés sur la Fig. V-19, nous ne constatons que de très légères différences entre les deux bétons : B32 et B35. Les lois de comportement obtenues pour les deux bétons déterminées par des fonctions exponentielles, avec des coefficients $R^2 > 0.9$, sont très rapprochées et presque identiques. Ce rapprochement montre que la structure poreuse est légèrement influencée par l'utilisation de deux ciments de différentes classes de

résistances mécaniques. Les distributions porales des deux bétons obtenues par intrusion de mercure, déjà présentées dans le chapitre IV sur la **Fig. IV-30** confirme ce résultat.

La perméabilité relative à l'eau du béton B32 est légèrement plus grande que celle du béton B35 en particulier pour les degrés de saturation intermédiaire (cf. **Fig. V-20**). En effet, les deux ciments utilisés présentent une légère différence entre leurs propriétés physico-chimiques, en particulier leur finesse de mouture. Cette dernière influe sur la cinétique d'hydratation du ciment et par conséquent sur la porosité du matériau où les pores plus petits, qui sont encore remplis par l'eau, contribuent d'une façon plus faible à la perméabilité relative à l'eau dans le béton B35 que dans le béton B32. Ceci indique que les pores plus grands occupent une fraction de porosité plus grande pour le béton B32 que pour le béton B35 (cf. **Fig. IV-30**).

L'évolution de la perméabilité relative à l'eau en fonction de la saturation donne des courbes concaves pour les deux bétons B32 et B35. Ces courbes sont très rapprochées et presque identiques et peuvent être présentées par une seule fonction exponentielle (cf. **Fig. V-20**).

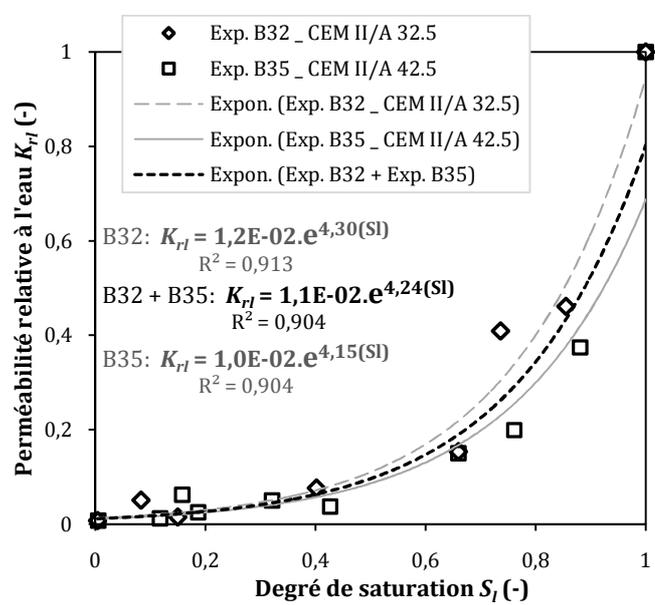


Fig. V-20. Perméabilité relative à l'eau en fonction de S_l pour les bétons B32 et B35.

V.7. Influence de la taille de l'échantillon sur la mesure de la perméabilité à l'eau

Deux séries d'échantillons du béton B35 de tailles différentes : (15 x 5) cm et (11 x 5) cm, sont testées dans cette partie. Pour comparer les résultats de K_l relatifs aux échantillons de ces deux séries, toutes les conditions des essais effectués doivent être similaires ; à savoir la pression appliquée et le temps de l'essai, et en même temps, adéquates à la taille des échantillons testés, telles que l'aire de contact entre l'eau sous pression et la surface plane de l'échantillon. Le rapport 2/3 (entre $d = 10$ cm : diamètre de la surface circulaire en contact avec l'eau et $D = 15$ cm : diamètre de la surface plane (section transversale) de l'échantillon du béton (égal à 10 cm/15 cm)) a été aussi respecté pour la série des échantillons de 11 cm de diamètre. À cet effet, des joints d'étanchéité en adéquation avec les diamètres des échantillons testés ont été utilisés pour l'essai de la perméabilité à l'eau du béton.

Les résultats obtenus indiquent que les deux courbes correspondant aux deux séries d'échantillons de différents diamètres sont presque identiques, sauf que dans le domaine des S_l intermédiaires, les valeurs de K_l des échantillons de 11 cm de diamètre est légèrement inférieure aux valeurs de K_l des échantillons de 15 cm de diamètre (cf. Fig. V-21). Ceci est expliqué par le fait que la teneur en eau dans les gros échantillons avec $D = 15$ cm est légèrement plus importante que dans les échantillons avec $D = 11$ cm, ce qui représente un effet favorable pour le passage de l'eau à travers certains pores qui sont remplis d'eau malgré la discontinuité de la totalité des molécules d'eau (ilots liquides) dans le matériau dans le domaine des S_l intermédiaires. Alors, le préconditionnement appliqué peut être moins influençant sur un échantillon de grande taille que sur un échantillon de petite taille. Dans ce dernier, l'état hydrique du matériau est considéré plus homogène que dans un échantillon avec $D = 15$ cm, ce qui nous laisse penser que les pores remplis d'eau sont un peu plus connectés dans l'échantillon de 15 cm de diamètre que dans l'échantillon de 11 cm pour la gamme des S_l intermédiaires.

À l'état complètement saturé, les résultats de K_l des échantillons de différentes tailles représentent presque les mêmes valeurs (cf. Fig. V-21), car elles sont calculées par la moyenne de débits des deux dernières heures seulement (cf. § V.2), ce qui assure un état parfaitement saturé ($S_l = 1$) pour les deux types d'échantillon, et dans ce cas, l'état hydrique du béton est la plus homogène possible. Donc, aucun effet de taille de l'échantillon testé n'est observé à l'état complètement saturé.

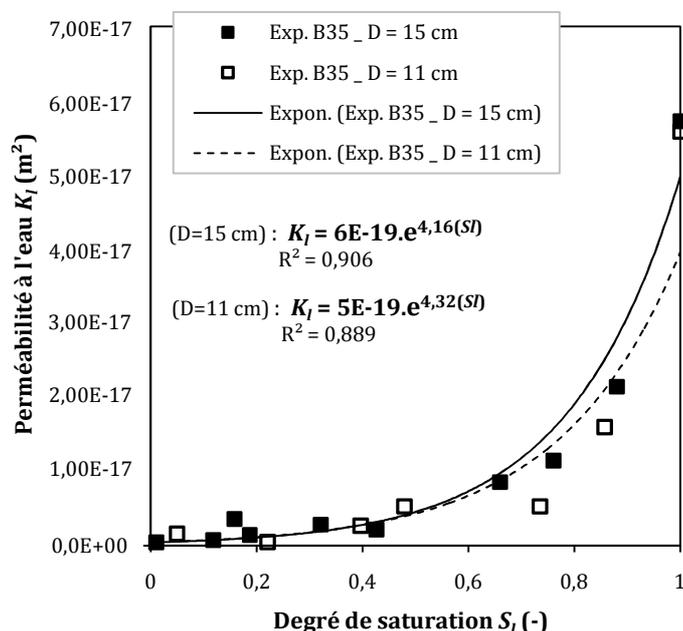


Fig. V-21. Perméabilité à l'eau des échantillons de différentes tailles en fonction de S_l .

Les perméabilités relatives des deux séries d'échantillons de différentes tailles, en fonction de la saturation, peuvent être présentées correctement par une seule fonction exponentielle. L'influence de la taille de l'échantillon sur l'évolution de $K_{r,l}$ en fonction de S_l est donc négligeable pour un béton ordinaire (B35) préconditionné par un séchage à 60°C.

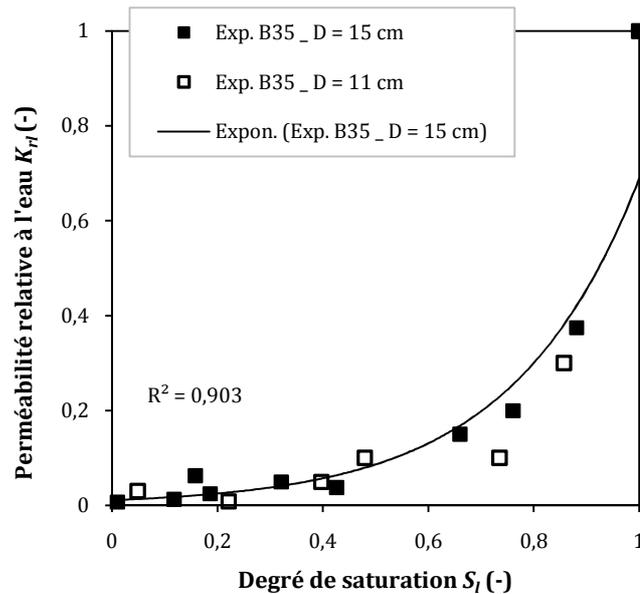


Fig. V-22. Perméabilité relative à l'eau des échantillons de différentes tailles en fonction de S_l .

V.8. Evaluation de K_l par la mesure de la profondeur de pénétration de l'eau

Dans ce paragraphe, l'estimation de la perméabilité est basée sur l'évaluation de la pénétration de l'eau après une application d'une pression de 3 bars pendant 24 heures dans deux échantillons de tailles différentes ((15 x 15) cm et (11 x 15) cm) en gardant la même surface de contact (78,5 cm²) entre l'eau sous pression et la surface plane de l'échantillon. Notons ici que les deux échantillons du béton sont confectionnés de la même gâchée B35 et ont été preconditionnés de la même façon par un séchage pendant 24 heures dans une étuve réglée à 60° C suivi par un séchage à l'air libre à 20 ± 2° C pendant 3 jours après une cure de 28 jours dans l'eau à 20 ± 2° C. Afin d'éviter au maximum les erreurs de mesure, ce test de pénétration a donc été effectué en même temps pour les deux corps d'épreuve (cf. [Fig. V-23](#)).

Les résultats montrent qu'après cette procédure de séchage choisie, les échantillons de 5 cm de hauteur montrent un taux de saturation d'environ 63 %. Nous faisons donc l'hypothèse que les échantillons testés de 15 cm de hauteur sont d'environ 65 % de saturation.

A la fin de l'essai, chaque échantillon de béton est pesé et sa masse est enregistrée. Un fendage des deux échantillons est appliqué et la moyenne des profondeurs de pénétration de l'eau mesurées au millimètre et calculée pour chaque échantillon (cf. [Fig. V-24](#)). Le coefficient de perméabilité à l'eau K_l a été calculé (en m/s) par l'équation de Valenta [VALE 70] (cf. [Eq. \(V-6\)](#)).

$$K_l = \frac{d^2 \cdot v}{2 \cdot h \cdot t} \quad (\text{V} - 6)$$

Où d est la profondeur de pénétration de l'eau dans le béton (m) ; v est la porosité du béton ; h est la charge hydraulique (m) ; et t est le temps de l'essai (temps sous pression) (s).

La valeur de v peut être calculée par l'équation suivante ([Eq. \(V-7\)](#)):

$$v = \frac{m}{A \cdot d \rho} \quad (\text{V} - 7)$$

Où m est la différence entre les masses de l'échantillon avant et après l'essai (g) ; A est l'aire de la section transversale de l'échantillon traversée par l'eau (mm^2) ; et ρ est la masse volumique de l'eau (1000 kg/m^3).



Fig. V-23. Essai de perméabilité sur deux échantillons de différents diamètres.

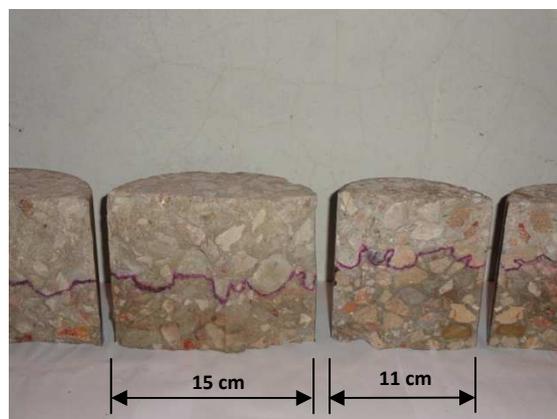


Fig. V-24. Mesure de la profondeur de pénétration de l'eau dans le béton.

Les mesures de la profondeur de pénétration de l'eau dans les deux échantillons testés ainsi que les résultats de K_l sont présentés dans le **Tab. V-2**.

Tab. V-2. Perméabilité à l'eau du béton B35 mesurée par la méthode de Valenta.

Béton B35 $\Phi \times H$ (cm)	Profondeur de pénétration de l'eau d (mm)	m (g)	v	K_l (E -18 m ²)
15 x 15	58	56,6	0,0321	2
11 x 15	81	39,7	0,0417	5,2

L'équation de Valenta (cf. **Eq. (V-6)**) permet l'estimation de la perméabilité à l'eau des échantillons de différents diamètres car elle est basée sur la section transversale traversée par l'eau liquide au lieu de la surface de l'échantillon en contact avec l'eau sous pression. Les résultats de K_l obtenus par cette méthode, pour les deux échantillons de diamètres 11 et 15 cm, sont rapprochés (même ordre de grandeur). Nous considérons que K_l , déterminé par la méthode de Valenta [VALE 70] n'est pas influencé par la taille de l'échantillon.

Nous avons évité d'utiliser cette méthode pour l'ensemble des échantillons présentant différents taux de saturation, car il était difficile de déterminer leur degré de saturation avec précision. La difficulté est liée à la saturation complète des gros échantillons de béton et d'obtenir une teneur en eau homogène dans ce cas. De plus, un temps de séchage long est nécessaire pour avoir une masse sèche du béton testé.

En outre, la profondeur de la pénétration à l'eau dans l'échantillon dans le domaine des S_l faibles est parfois négligeable et difficile à mesurer. Le fendage de l'éprouvette testée comme dernière étape effectuée à l'aide d'une presse hydraulique, représente aussi un inconvénient pour cette méthode qui ne nous permet pas de saturer ou de sécher complètement l'échantillon à la fin de l'essai, car certains écailles qui tombent par terre après le fendage de l'échantillon peuvent conduire à des résultats erronés de la masse sèche ou saturée du béton récupéré après l'opération du fendage.

V.9. Évaluation de la perméabilité par le modèle de Katz-Thompson II

La perméabilité intrinsèque à l'eau (K_l) peut être estimée indirectement à l'aide de la relation de Katz-Thompson [KATZ 86], développée à l'origine pour les roches sédimentaires et fondée sur la théorie de percolation.

La théorie de Katz-Thompson est parmi les rares modèles qui peuvent évaluer la perméabilité des mortiers et bétons à partir des mesures de porométrie par intrusion de mercure [AÏT-A 06]. Cette relation peut en effet permettre une estimation de la perméabilité intrinsèque aux liquides des matériaux cimentaires, lorsque le diamètre critique des pores d_c et le facteur de formation F du matériau sont connus [GARB 90].

En résumé, le modèle de Katz-Thompson consiste à évaluer un diamètre hydraulique sur la base de la théorie de la percolation, en considérant que pour les matériaux dont la distribution des diamètres des pores est très étalée, un sous réseau de pores de plus grand diamètre, qui détermine la conductivité effective et la perméabilité intrinsèque (voir § II.3.2) [DAÏA 01]. Ce sous réseau possède une concentration voisine du seuil de percolation repérable en porométrie mercure par un diamètre de pore critique d_c , c'est-à-dire par un diamètre minimum des pores qui sont géométriquement continus (connectés) dans tout le volume de l'échantillon et il est lié au diamètre hydraulique (cf. Eq. (V-8)) par les relations fondamentales de la percolation [KATZ 86], [THOM 87]:

$$K_l = \frac{d_c^2}{226 \cdot F} \quad (\text{V} - 8)$$

Où F est le facteur de formation ($F > 1$) qui peut être calculé comme un rapport de résistivités (ou conductivité) électriques ou de coefficients de diffusion des chlorures [GARB 90], [MART 95], [DAÏA 01]. Le facteur F est défini donc par le rapport entre la conductivité électrique de la solution interstitielle des pores (σ_0), ou le coefficient de diffusion D_0 des ions dans la solution, et la conductivité électrique du matériau saturé en eau, ou le coefficient de diffusion du matériau saturé, selon l'équation suivante (Eq. (V-9)) :

$$F = \frac{\sigma_0}{\sigma} = \frac{D_0}{D} \quad (\text{V} - 9)$$

Le facteur de formation a été estimé aussi à partir des seuls résultats d'intrusion de mercure (en fonction du diamètre critique d_c) [KATZ 87], [EL-DI 94], [TUMI 98].

Cette méthode appelée « méthode de Katz-Thompson II » est fondée sur la séparation du réseau poreux en deux classes de canaux [THIE 03]. On se donne d une taille de pore inférieure au diamètre critique d_c . On considère que tous les pores de diamètre supérieur à d ont une conductance hydraulique nulle, tandis que ceux de diamètre inférieur ont une conductance fixée correspondant à celle d'un pore cylindrique de diamètre d . La conductance hydraulique (g_h) des pores de diamètre d peut être calculée par l'Eq. (V-10):

$$g_h(d) = \Phi \cdot \frac{1}{89} \cdot \frac{L}{d_c} d^3 \cdot S(d) \quad (\text{V} - 10)$$

Où Φ est la taille du pore inférieure à d_c , $S(d)$ est la fraction volumique de pores connectés à l'amas infini de rayon inférieur à d ($S(d > d_c) = 0$ et $g_h(d > d_c) = 0$). L désigne une taille caractéristique de l'échantillon subissant l'intrusion de mercure.

La théorie de Katz-Thompson consiste à maximiser la conductance pour se rapprocher au mieux des valeurs réelles [WANG 12]. Nous retenons donc la valeur d_{max} qui maximise $d^3 \cdot S(d)$ (pour $d \leq d_c$), comme illustré sur les Figs. V-26, V-27, V28 et V-29. L'estimation de la perméabilité intrinsèque K_l des matériaux est ensuite donnée par l'Eq. (V-11) [GAO-Z 13]:

$$K_l = \frac{(d_{max})^2}{89} \cdot \frac{d_{max}}{d_c} \cdot \Phi_{Hg} \cdot S(d_{max}) \quad (V - 11)$$

Où K_l est la perméabilité intrinsèque (m^2 ou milidarcy), d_{max} est le diamètre des pores par lesquels la conductance hydraulique est au maximum (nm), d_c est le diamètre critique caractéristique des pores du milieu poreux déterminé comme étant le diamètre du pore le plus petit nécessairement rempli pour initier un écoulement à travers le matériau (généralement défini par le seuil de pénétration du mercure dans l'essai de porométrie au mercure) (nm), Φ_{Hg} est la porosité totale du matériau, $S(d_{max})$ est la fraction du volume poreux interconnecté de diamètres supérieurs ou égal à d_{max} .

Webb (2001) [WEBB 01] décrit les détails de la méthode de Katz-Thompson II et les étapes à suivre pour la détermination de chaque paramètre dans l'Eq. V-11 pour la prédiction de la perméabilité.

Le diamètre critique des pores est généralement défini par le seuil de pénétration du mercure dans l'essai de porométrie au mercure. Alors, pour obtenir le diamètre critique d_c à partir des données de la PIM, la détermination du point d'inflexion sur la courbe d'intrusion cumulative est nécessaire (cf. Fig. V-25). Ce point est défini comme étant la pression seuil (P_t) qui correspond à la plus grande valeur sur la courbe Log intrusion différentielle ($dV/dLogD$ en mL/g) en fonction de la pression d'intrusion (P en psi ou MPa). La valeur d_c est alors calculée à partir de l'équation de Washburn (1921) [WASH 21] (cf. Eq. (III-2) et § III.6) pour la pression P_t .

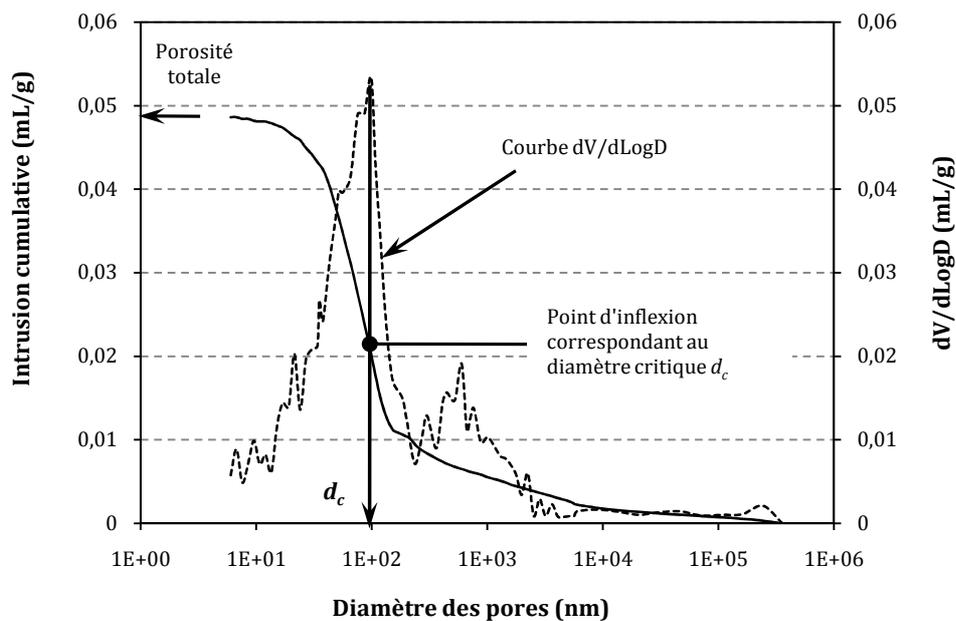


Fig. V-25. Détermination de d_c du béton B35 à partir de la distribution des volumes poreux obtenue par PIM.

La valeur du volume cumulatif d'intrusion V_t relatif à la pression de seuil P_t est soustraite à chaque volume d'intrusion V_c pour chaque pression à partir de la pression seuil jusqu'à la pression maximale. Les points situés avant le point seuil (P_t) ne sont pas pris en compte, car si on se donne d un diamètre de pore inférieur au diamètre critique d_c , on considère que tous les pores de diamètre supérieur à d ont une conductance hydraulique nulle [WANG 12].

Le volume net ($V_c - V_t$ en cm^3 multiplié par d^3 en nm^3) est tracé en fonction des diamètres des pores (nm) correspondant. C'est la fonction de la conductivité hydraulique (cf. Figs. V-26, V-27, V-28 et V-29). Le diamètre du pore correspondant à la valeur maximale en ordonnées est d_{max} . Le volume cumulatif du mercure injecté à ce diamètre est $V_{d_{max}}$. La fraction $S(d_{max})$ est calculée comme étant le rapport de $V_{d_{max}}/V_{tot}$; c'est la fraction du volume poreux interconnecté de diamètres supérieurs à d_{max} [WEBB 01].

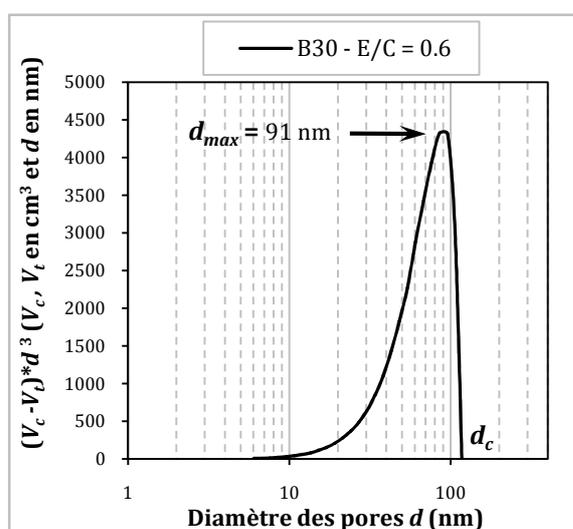


Fig. V-26. Détermination de d_{max} (pour $d < d_c$) du béton B30 à partir de la distribution des volumes poreux, obtenue par PIM.

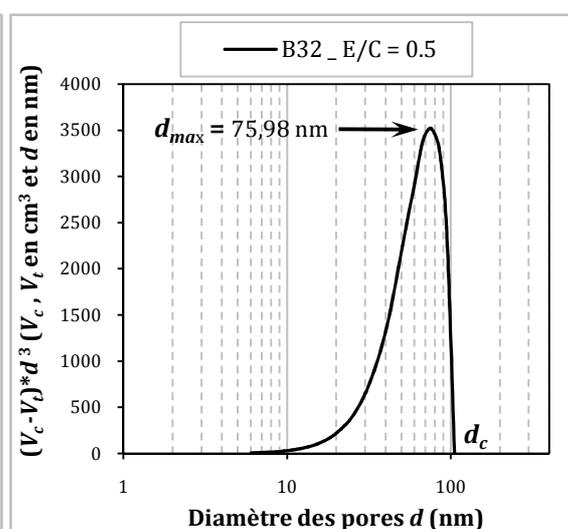


Fig. V-27. Détermination de d_{max} (pour $d < d_c$) du béton B32 à partir de la distribution des volumes poreux, obtenue par PIM.

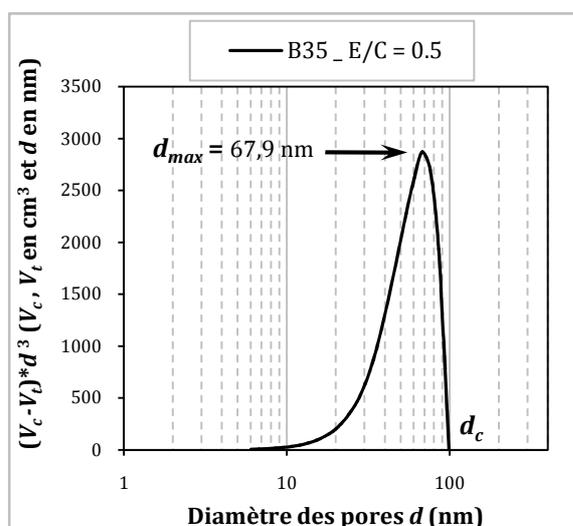


Fig. V-28. Détermination de d_{max} (pour $d < d_c$) du béton B35 à partir de la distribution des volumes poreux, obtenue par PIM.

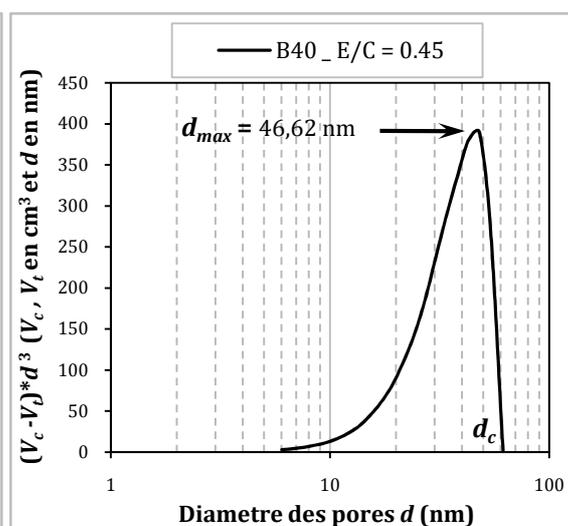


Fig. V-29. Détermination de d_{max} (pour $d < d_c$) du béton B40 à partir de la distribution des volumes poreux, obtenue par PIM.

Les valeurs de la perméabilité intrinsèque ainsi que les paramètres de calcul sont donnés dans le **Tab. V-3**.

Tab. V-3. Paramètres de calcul de perméabilité des différents BO étudiés.

Bétons	Porosité Φ_{Hg} (%)	d_c (nm)	d_{max} (nm)	$S(d_{max})$	Perméabilité calculée (m^2)
B30	13,68	117	91	0,45498	4,5 E-18
B32	12,23	106	75,98	0,55655	3,2 E-18
B35	11,08	99	67,9	0,62448	2,5 E-18
B40	8,52	62	46,62	0,71772	1,1 E-18

La perméabilité calculée par la méthode de Katz-Thompson II est avec environ deux ordres de grandeur plus faible que celle mesurée expérimentalement au gaz, et avec un ordre de grandeur plus faible que celle mesurée à l'eau liquide pour les quatre bétons étudiés. Mais, malgré cette différence entre les perméabilités mesurées et celles calculées, les valeurs trouvées de perméabilité, à l'aide de cette relation (Katz-Thompson II), indiquent les mêmes rapports, mentionnés plus haut, entre les perméabilités des différents bétons mesurées expérimentalement.

Les bétons sont classés en fonction du degré de perméabilité décroissant $B40 < B35 < B32 < B30$ (cf. **Tab. V-3**). Ceci est confirmé par les résultats présentés sur les **Figs. V-30** et **V-31** qui montre respectivement des comparaisons entre les valeurs de K_g mesurées expérimentalement et celles calculées à l'aide de la relation de Katz-Thompson II, ainsi qu'entre les valeurs de K_l mesurées et celles calculées par le même modèle pour tous les bétons étudiés. Les histogrammes illustrés sur la **Fig. V-32** permettent une comparaison entre les différentes perméabilités déterminées (mesurées et calculées) à l'état saturé (par le fluide percolant) pour les quatre bétons ordinaires.

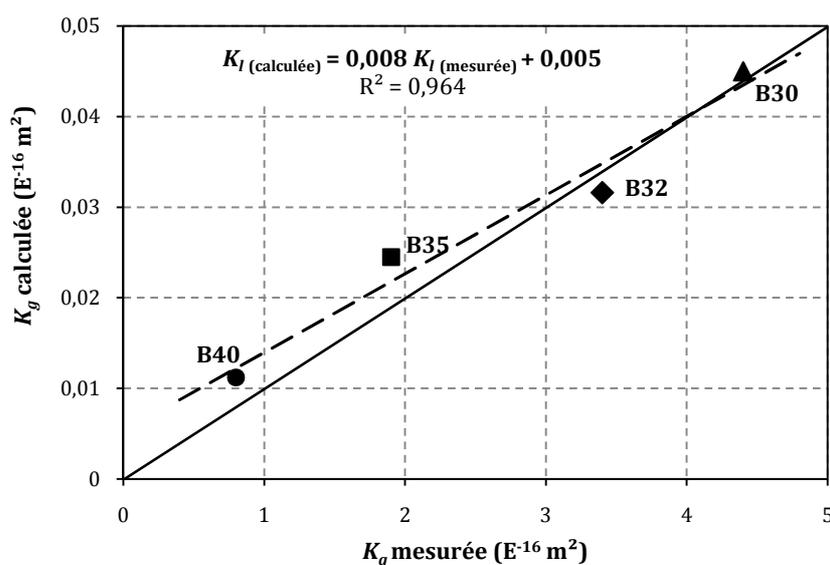


Fig. V-30. Perméabilité au gaz mesurée et calculée pour les quatre bétons étudiés.

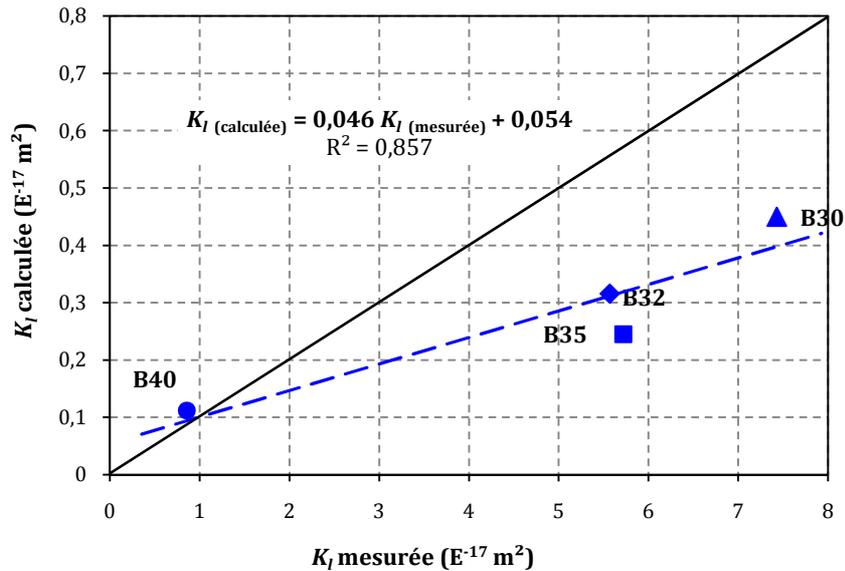


Fig. V-31. Perméabilité à l'eau mesurée et calculée pour les quatre bétons étudiés.

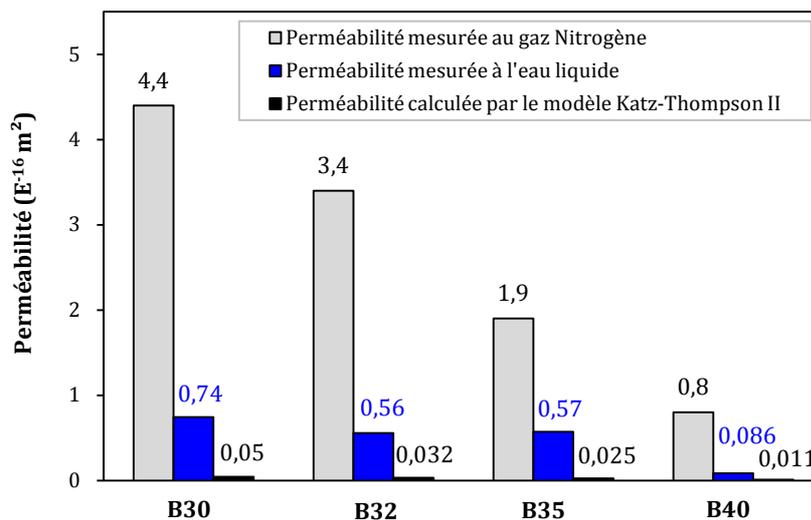


Fig. V-32. Comparaison entre les différentes perméabilités déterminées pour les quatre bétons étudiés.

En effet, la relation de Katz-Thompson II est basée seulement sur les résultats de porosimétrie par intrusion de mercure pour la détermination du diamètre critique (d_c) et pour disposer du facteur de formation (F). Cette méthode s'avère plus pratique. Cependant, de grandes incertitudes sont introduites par cette méthode, puisque la taille des échantillons utilisés pour la mesure de la distribution des volumes poreux par intrusion au mercure (des morceaux à base de mortier) n'est pas parfaitement représentative du béton étudié en comparant avec la dimension caractéristique utilisée pour la mesure de la perméabilité expérimentalement. De plus, l'échantillon testé en porosimétrie au mercure ne représente que la partie mortier (pâte du ciment et sable) dans le béton. L'échantillon testé en porosimétrie ne contient certainement pas des gros granulats comme le gravier de gros diamètre par exemple. Nous rappelons que c'est l'auréole de transition (zone autour du granulat) qui représente la zone la plus poreuse dans le béton et plus le gravier présente un

D_{max} important, plus l'épaisseur de cette zone interfaciale est importante. Par ailleurs, ce modèle de Katz-Thompson ne représente pas la bi-modalité de la structure poreuse du matériau (cf. Fig. IV-25), ainsi que la tortuosité et la constrictivité des pores dans le béton [HAMA 09].

V.10. Conclusion

Les mesures de la perméabilité à l'eau liquide ont été réalisées, sur l'ensemble des échantillons des différents BO étudiés et à différents degrés de saturation, par une méthode directe en régime non stationnaire à l'aide d'un dispositif disponible au laboratoire EOLE (cf. Fig. III-13), développé à l'origine pour la mesure de la profondeur de pénétration d'eau sous pression dans le béton. Le débit d'eau a été mesuré chaque heure pendant une durée de 6 heures sous un gradient de pression constant. Le choix de cette procédure rapide était principalement fait dans le but d'éviter une re-saturation des échantillons du béton partiellement saturé. De plus, la réactivité du fluide avec les matériaux cimentaires est la principale cause qui conduit à une sous-évaluation de la perméabilité à l'eau du béton. Pour limiter cette influence, il convient de considérer la perméabilité au tout début de l'essai. Nous pensons alors, que la valeur mesurée est proche de la vraie perméabilité.

La perméabilité à l'eau liquide est fortement dépendante du taux de saturation du béton. Le préconditionnement appliqué a donc une grande influence sur la mesure. Plus le béton est saturé en eau liquide, plus sa perméabilité à l'eau augmente. Le coefficient K_l présente la même évolution pour $S_l \leq 0.5$. À cet intervalle les courbes fournissent des valeurs très faibles de K_l . Dans ce domaine, la phase liquide se trouvant dans les pores est discontinue et aucun transport significatif (Darcéen) sous forme liquide ne peut par conséquent avoir lieu. D'autre part, au-delà de $S_l = 0.6$, la perméabilité à l'eau augmente considérablement avec le degré de saturation du matériau en indiquant une valeur maximale quand le matériau est complètement saturé en eau. Dans ce domaine des S_l élevés, le transport liquide, dominé par l'écoulement de Darcy, est prépondérant.

Les résultats obtenus montrent que les données expérimentales, correspondant à l'évolution de la perméabilité intrinsèque à l'eau liquide en fonction de la saturation, peuvent être estimées correctement en utilisant une fonction exponentielle. Mais il est difficile d'établir une seule et même loi de comportement pour les différents BO étudiés.

Pour chaque béton testé, une courbe de perméabilité relative à l'eau liquide en fonction de la saturation ($K_{rl} = K_{rl}(S_l)$) a été déterminée. Les résultats indiquent que la perméabilité relative à l'eau (K_{rl}) augmente avec le degré de saturation du matériau. Elle montre une courbe concave en fonction de la saturation, qui peut être présentée correctement par une fonction exponentielle.

La perméabilité est dépendante de la structure poreuse du béton. Donc, les paramètres de formulation (rapport E/C , volume global des granulats, taille des granulats et la classe de résistante de ciment) influent sur la perméabilité intrinsèque à l'eau (K_l) du béton à cause de leurs influences sur la porosité du matériau. Les résultats obtenus montrent que l'influence de ces paramètres de formulation n'est pas très significative sur l'évolution de la perméabilité relative à l'eau (K_{rl}) en fonction de la saturation qui peut être présentée par une seule fonction exponentielle pour les quatre bétons. Ce rapprochement entre leurs

fonctions ne peut être expliqué que par les porosités (distributions de la taille des pores) très rapprochées des bétons étudiés (cf. Figs. IV-25 et IV-30).

L'originalité de cette étude provient de l'utilisation des échantillons de différents diamètres pour déterminer l'influence de la taille de l'échantillon sur la mesure de la perméabilité à l'eau. Les résultats expérimentaux obtenus montrent une différence qui n'est pas notable entre les valeurs de perméabilité des échantillons de 11 cm de diamètre et celles obtenues dans le cas d'un diamètre de 15 cm de diamètre, ou légère dans la gamme intermédiaire de saturation. Donc, l'influence de la taille de l'échantillon est considérée non significative sur la mesure de perméabilité à l'eau du béton.

L'effet de taille de l'échantillon a été aussi étudié en utilisant deux échantillons cylindriques de 11 et 15 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur dont la perméabilité à l'eau a été déterminée dans cette partie par la méthode de Valenta, basée sur la mesure de la profondeur de pénétration d'eau sous pression pendant un temps t de l'essai. Cette méthode donne des valeurs de perméabilité relativement plus faibles (d'un ordre de grandeur de $E^{-18} m^2$) et l'effet de taille n'est toujours pas significatif.

Dans une dernière partie de ce chapitre, la perméabilité a été calculée par le modèle de Katz-Thompson II, basé sur les résultats de la porosité déterminée par intrusion de mercure. Les valeurs obtenues par ce modèle, sont plus faibles que celles mesurées expérimentalement. De grandes incertitudes sont introduites par cette méthode, puisque la taille des échantillons utilisés (d'environ $2 cm^3$) pour la mesure de la distribution des volumes poreux par intrusion au mercure, n'est pas parfaitement représentative du béton étudié (échantillon utilisé pour l'essai de perméabilité). Par ailleurs, la présence des gros granulats et la tortuosité des pores, qui peuvent influencer sur le transfert d'un fluide dans le béton, ne sont pas prises en compte par ce modèle.

Chapitre VI. Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative du béton.

Sommaire

VI.1. Introduction.....	156
VI.2. Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative au gaz du béton.....	157
VI.2.1. Calcul de la perméabilité relative au gaz par des modèles prédictifs.....	157
VI.2.2. Évaluation de K_{rg} par la relation de Van Genuchten-Mualem des échantillons du béton différemment pré-conditionnés.....	159
VI.2.3. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rg} des bétons de différents rapports E/C	161
VI.2.4. Calcul de K_{rg} à l'aide du modèle de Van Genuchten-Mualem pour des bétons à base des ciments de différentes classes de résistance mécanique.....	161
VI.2.5. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rg} pour des échantillons du béton de différentes tailles.....	162
VI.3. Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative à l'eau du béton.....	166
VI.3.1. Calcul de la perméabilité relative à l'eau par des modèles prédictifs.....	166
VI.3.2. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rl} des bétons de différents rapport E/C	167
VI.3.3. Évaluation de K_{rl} à l'aide des modèles prédictifs pour des bétons à base des ciments de différentes classes de résistance mécanique.....	168
VI.3.4. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rl} des échantillons du béton de différentes tailles.....	170
VI.4. Conclusions.....	171

Chapitre VI. Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative du béton.

VI.1. Introduction

Dans ce chapitre, la validation de modèles issus de la littérature (développés à l'origine pour les sols), pour la prévision des transferts dans les milieux poreux non saturés, a été vérifiée pour les bétons ordinaires objet de cette étude.

Dans une première partie, la validité de certains modèles prédictifs de la perméabilité relative aux gaz des milieux poreux partiellement saturés, tels que le modèle de Van Genuchten [VAN-G 80] et l'expression analytique proposée par Monlouis-Bonnaire [MONL 04], a été vérifiée pour les quatre bétons étudiés. Cette vérification avec les données expérimentales a été effectuée selon plusieurs paramètres influençant la perméabilité au gaz du béton à différents degrés de saturation et pour des échantillons de différentes tailles.

La validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative à l'eau liquide en fonction de la saturation des milieux poreux a été aussi vérifiée, dans la deuxième partie de ce chapitre. Les modèles testés dans cette partie -souvent acceptés pour les sols non saturés-, tels que le modèle de DiCarlo [DiCA 03] et de Fatt & Klikoff [FATT 59] ou encore de Van Genuchten [VAN-G 80], ont été vérifiés avec les résultats expérimentaux obtenus pour des échantillons du béton de différentes tailles et avec différents paramètres de formulation.

Pour un bon ajustement de la modélisation avec les données expérimentalement obtenues sur les différents échantillons (de différentes tailles), des modifications de certains modèles - à l'origine développés pour les sols- ont été proposés pour la prédiction de la perméabilité relative au gaz et à l'eau liquide en fonction de la saturation pour l'ensemble des bétons étudiés.

VI.2. Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative au gaz du béton

VI.2.1. Calcul de la perméabilité relative au gaz par des modèles prédictifs

Les mesures expérimentales du coefficient de perméabilité des matériaux partiellement saturés sont très difficiles à effectuer quand les performances du béton sont améliorées [BARO 07a]. Pour éviter la difficulté de ces mesures, une expression analytique est souvent admise dans la littérature pour l'évaluation de la perméabilité relative d'un milieu poreux. Cette expression, basée sur les travaux de Mualem (1976) [MUAL 76], a été dérivée par Van Genuchten (1980) [VAN-G 80]. Elle s'écrit quand le béton est sec ($S_l = 0$) avec $K_{rg}(S_l) = 1$ (cf. Eq. (VI-1)) [BARO 08]:

$$K_{rg} = (1 - S_l)^q \cdot (1 - S_l^{1/m})^{2m} \quad (\text{VI} - 1)$$

Dans cette relation de Van Genuchten-Mualem, les coefficients d'exposant q et m , représentent des paramètres empiriques. Le paramètre m est dérivé à partir du paramètre d'ajustement b qui est associé à l'expression analytique de la courbe de pression capillaire de la matière $P_c = P_c(S_l)$ (cf. § I.3.4, § II.3.4, Fig. I-18 et Fig. II-21) avec $b = 1/m$ [COUS 01] (cf. Eq. (VI-2)).

Notons que Van Genuchten a déterminé ces coefficients, en comparant le modèle et les données expérimentales de 45 sols [VAN-G 80], pour une gamme de valeurs : $-1 \leq q \leq 3$.

$$P_c(S_l) = a(S_l^{-b} - 1)^{1-\frac{1}{b}} \quad (\text{VI} - 2)$$

Où a et b sont des paramètres d'ajustement, qui dépendent de la microstructure du matériau en particulier de la connectivité du système poreux.

Nous rappelons que la courbe de la pression capillaire est extraite de la loi de Kelvin (cf. § I.3.4 et Eq. (I-3)) à partir des mesures expérimentales de la désorption isotherme de la vapeur d'eau (selon la porosité totale et la masse volumique sèche du matériau) [BARO 99], [BARO 01].

Dans la littérature, différentes valeurs de a et b sont disponibles selon le matériau étudié (mortier ou béton). En particulier, Baroghel-Bouny (1999) [BARO 99] propose pour un béton ordinaire, une valeur de 2.2748 pour le paramètre b et 18.6237 pour le paramètre a . Dans ce cas, le coefficient exposant m dans la relation de Van Genuchten-Mualem (cf. Eq. (VI-1)) est égal à 0.44.

Notre objectif n'est pas de discuter l'origine de la relation de Van Genuchten-Mualem (cf. Eq. (VI-1)); mais on s'intéresse plutôt à l'analyse de la capacité de cette expression -développée à l'origine pour les sols- de décrire le comportement du béton et donc d'étudier la validité de ce modèle prédictif pour le calcul de K_{rg} des bétons étudiés en fonction de la saturation.

On procède alors de la façon suivante : on fixe la valeur de m à 0.5, valeur moyenne de plusieurs résultats expérimentaux trouvés dans la littérature, variant pour le béton ordinaire entre 0.44 et 0.56 [JASO 04] et on fait varier la valeur de q afin de s'approcher au maximum des résultats expérimentaux de K_{rg} .

L'évolution de la perméabilité relative au gaz du béton en fonction de son degré de saturation sera déterminée par l'Eq. (VI-3):

$$K_{rg} = (1 - S_l)^q \cdot (1 - S_l^2) \quad (\text{VI} - 3)$$

Selon Parker *et coll.* (1987) [PARK 87], dans le cas des sols, lors de l'extension du modèle de Mualem (1976) [MUAL 76] à la phase non mouillante, ce paramètre q est pris égal à 0.5 dans l'Eq. (VI-3). En outre, Monlouis-Bonnaire (2004) [MONL 04] a constaté que la perméabilité relative au gaz, calculée par la relation initiale de Van Genuchten-Mualem, ne décrit pas le comportement expérimental du béton. Ainsi, il a proposé, pour l'évaluation de K_{rg} des matériaux cimentaires, un ajustement du modèle de Van Genuchten-Mualem avec une valeur de paramètre q égale à 5.5. Dans cette étude, l'ajustement proposé par Monlouis-Bonnaire (2004) a été aussi vérifiée

Les résultats analytiques de $K_{rg}(S_l)$, obtenus avec tous les bétons étudiés, ont été calculés à l'aide des modèles analytiques proposés par Parker *et coll.* (1987) [PARK 87] et Monlouis-Bonnaire (2004) [MONL 04] et les valeurs sont illustrées sur les Figs. VI-1, VI-2, VI-3 et VI-4. De plus, les résultats analytiques obtenus par l'application de la loi de Van Genuchten-Mualem, ont été comparés avec les données expérimentales des quatre bétons et avec différentes valeurs du paramètre q égales à 2.5, 3.5 et 4.5.

La perméabilité relative au gaz marque la diminution de l'espace poreux accessible au fluide quand la saturation liquide augmente, et inversement. Les Figs. VI-1, VI-2, VI-3 et VI-4 montrent que l'évolution de K_{rg} en fonction du degré de saturation est présentée par des courbes concaves pour tous les bétons étudiés. Ces valeurs expérimentales sont déjà présentées plus haut en section § IV.4. Nous rappelons que les résultats présentés dans toutes les figures ci-dessous correspondent à des moyennes arithmétiques de trois valeurs de K_{rg} calculées pour chaque degré de saturation et pour chaque béton étudié.

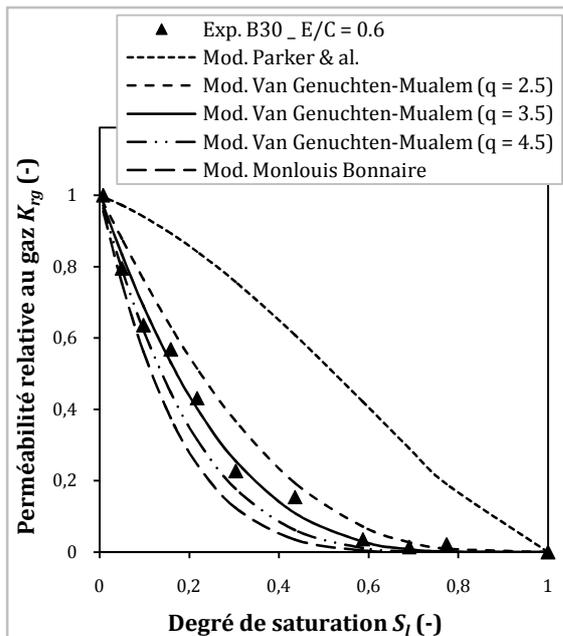


Fig. VI-1. Validation de la modélisation pour le calcul de K_{rg} en fonction de S_l pour le béton B30.

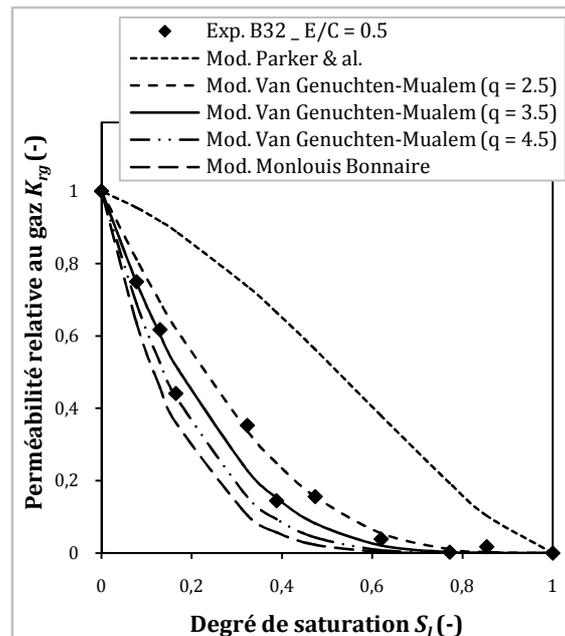


Fig. VI-2. Validation de la modélisation pour le calcul de K_{rg} en fonction de S_l pour le béton B32.

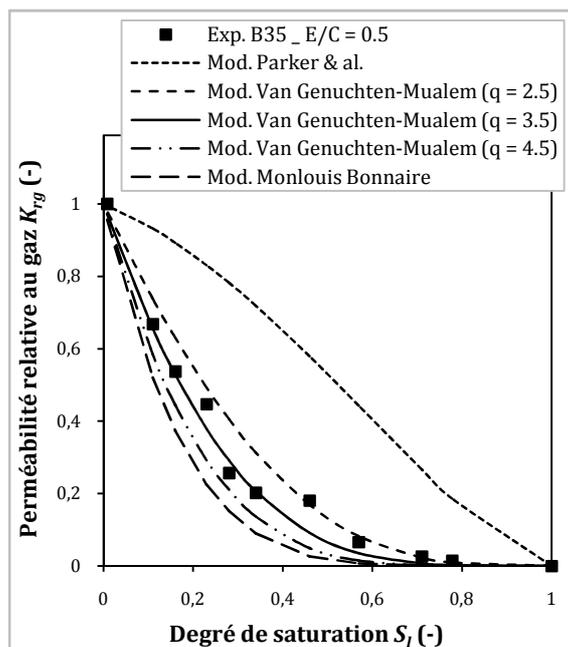


Fig. VI-3. Validation de la modélisation pour le calcul de K_{rg} en fonction de S_l pour le béton B35.

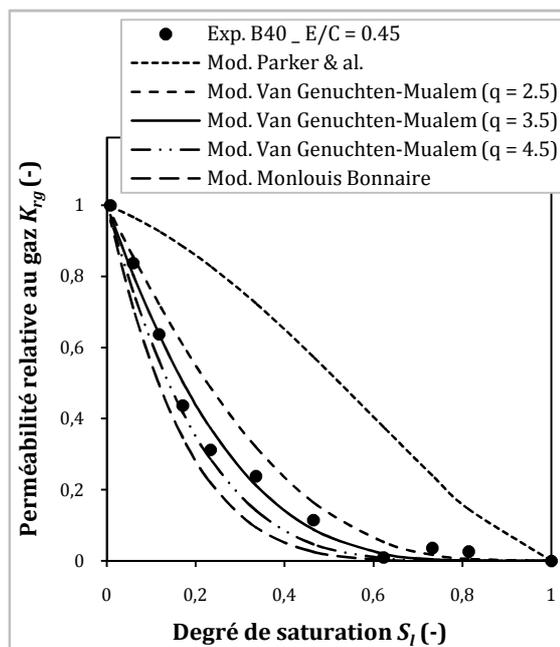


Fig. VI-4. Validation de la modélisation pour le calcul de K_{rg} en fonction de S_l pour le béton B40.

Les Figs. VI-1, VI-2, VI-3 et VI-4, montrent que le modèle de Van Genuchten-Mualem s'ajuste avec les résultats expérimentaux. La modélisation tend à sous-estimer la perméabilité relative au gaz, lorsque la saturation est supérieure à 0.6 [MONL 04]. À partir des courbes obtenues, nous considérons que la valeur de paramètre $q = 3.5$ est la plus appropriée pour le calcul de K_{rg} en fonction de S_l , principalement lorsque $S_l < 0.3$. Pour des valeurs intermédiaires : $0.3 < S_l \leq 0.6$, et principalement dans le cas des bétons avec une porosité accessible à l'eau relativement élevée, la modélisation avec un paramètre $q = 3.5$ tend à sous-estimer légèrement les données expérimentales. Ceci peut être traduit par le fait que dans cet intervalle des S_l , plus de pores vides (remplis d'air) sont disponibles dans les bétons B30, B32 et B35 par rapport au béton B40. En outre, on peut constater que l'ajustement proposé par Monlouis-Bonnaire (2004) [MONL 04] conduit à une sous-estimation des résultats expérimentaux obtenus pour les BO étudiés. De plus, la perméabilité relative au gaz, calculée par la relation donnée par Parker *et coll* (1987) [PARK 87], ne décrit pas le comportement expérimental du béton.

VI.2.2. Evaluation de K_{rg} par la relation de Van Genuchten-Mualem des échantillons du béton différemment pré-conditionnés

Les résultats de la perméabilité relative au gaz (K_{rg}) en fonction de S_l des deux séries d'échantillons du béton B35 séchées différemment à 60° et à 80° C, sont présentés sur la Fig. VI-5. Nous rappelons que l'influence de la procédure de séchage (cf. § III.9) n'a été étudiée que dans le cas du béton B35, dont les résultats de K_{int} obtenus pour les deux séries d'échantillons de ce béton sont discutées en fonction de la saturation et selon le pré-conditionnement appliqué au chapitre IV (cf. § IV.5).

Dans ce paragraphe, nous n'avons vérifiés que la validation du modèle Van Genuchten-Mualem pour l'évaluation de la perméabilité relative au gaz des milieux poreux puisque les résultats obtenus plus haut en section § VI.2 montrent que les relations données par Parker

et coll [PARK 87] et par Monlouis-Bonnaire [MONL 04] ne s'ajustent qu'imparfaitement avec les résultats expérimentaux obtenus pour le béton B35 (cf. Fig. VI-3).

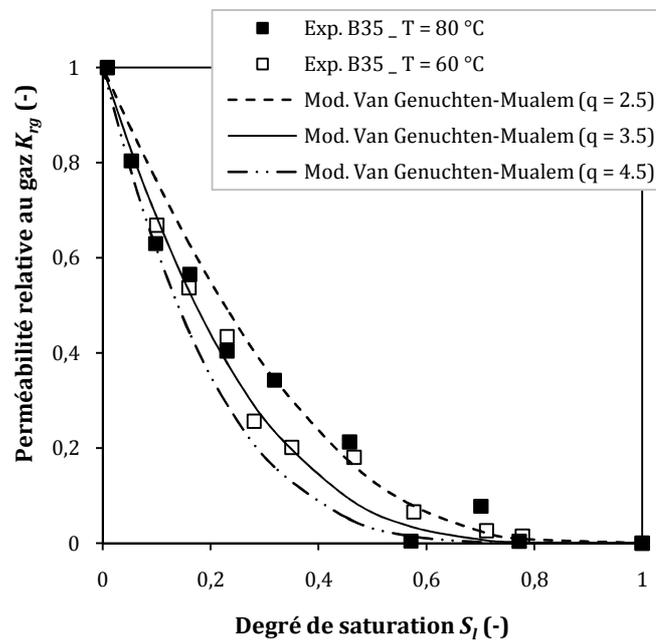


Fig. VI-5. Validité du modèle de Van Genuchten-Mualem pour l'évaluation de K_{rg} en fonction de S_l pour le béton B35 séché à 60° et à 80° C.

Les résultats montrent une décroissance très importante de K_{rg} des deux séries d'échantillons dans un intervalle restreint du degré de saturation : $0 < S_l \leq 0.25$). On ne peut distinguer entre les valeurs de K_{rg} des deux séries d'échantillons testés dans cette gamme de S_l , dans lequel, on considère que le modèle de Van Genuchten-Mualem avec un paramètre q égal à 3.5, s'ajuste correctement avec nos résultats expérimentaux. En revanche, pour l'intervalle intermédiaire de : $0.3 \leq S_l \leq 0.5$), la perméabilité relative au gaz obtenue pour un séchage à 80° C représente des valeurs légèrement supérieures à celles obtenues pour 60° C ; elle peut d'ailleurs être calculée dans cet intervalle de S_l à l'aide du modèle de Van Genuchten-Mualem en utilisant un paramètre $q = 2.5$ (cf. Fig. VI-5). Nous pensons que dans cet intervalle du degré de saturation, la discontinuité entre les molécules d'eau dans le réseau poreux d'un béton peut être accélérée à l'aide d'un séchage plus avancé en température ce qui permet un passage plus facile du gaz. Au-delà d'une saturation de 50 % ($0.5 < S_l \leq 1$), les résultats de K_{rg} des deux séries d'échantillons ne peuvent être distingués et représentent des valeurs très faibles à quasiment nulles. Dans cette intervalle de S_l une sous-estimation de la perméabilité relative par le modèle de Van Genuchten-Mualem est plus remarquée dans le cas du paramètre $q = 3.5$ et 4.5 que dans le cas de $q = 2.5$. On peut constater qu'au-delà de $S_l = 0.3$, le modèle de Van Genuchten-Mualem avec un paramètre $q = 2.5$ est le plus approprié pour le calcul de la perméabilité relative au gaz du béton séché à 80° C. Donc, dans cette gamme de saturation $S_l \geq 0.3$, plus la température de séchage est élevée, plus le paramètre d'ajustement q utilisé pour l'évaluation de K_{rg} , diminue.

VI.2.3. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rg} des bétons de différents rapport E/C

La Fig. VI-6 présente une superposition des valeurs de K_{rg} des bétons B30, B35 et B40 en fonction de leurs degrés de saturation (déjà présentées plus haut en section § IV.4).

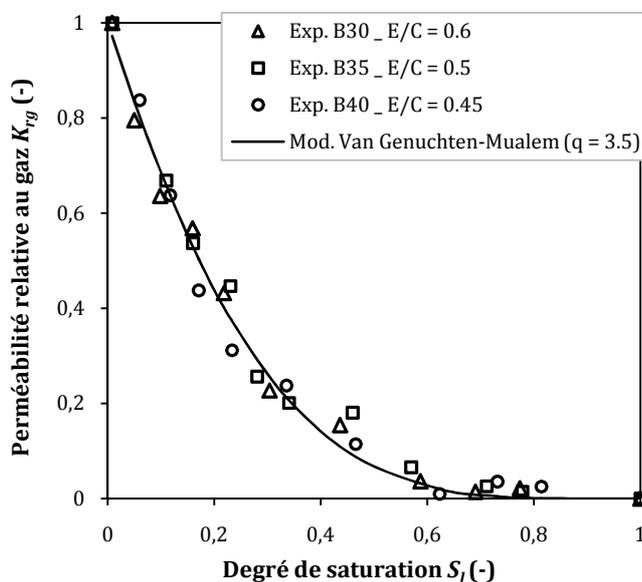


Fig. VI-6. Perméabilité relative au gaz des bétons B30, B35 et B40 en fonction de la saturation. (Validation du modèle de Van Genuchten-Mualem ajusté avec un paramètre $q = 3.5$).

Les résultats obtenus à partir de cette étude comparative montrent que la valeur de q égale à 3.5 est la plus appropriée pour le calcul de K_{rg} en fonction de S_l à l'aide de la relation de Van Genuchten-Mualem (Eq. (VI-3)) pour les trois bétons étudiés avec différents rapports E/C . En effet, ce résultat est obtenu car les bétons comparés dans ce paragraphe sont des BO avec des porosités (distribution des tailles de pores) très rapprochées (cf. Figs. IV-25 et IV-30). On pense, en revanche qu'un ajustement par une valeur de paramètre $q = 3.5$ ne pourra pas être approprié pour un BHP de très faible porosité par exemple.

Nous rappelons que Monlouis-Bonnaire (2004) [MONL 04] propose pour le béton ordinaire qu'il a étudié, à $E/C = 0.48$ et une porosité à l'eau de $13.2 \pm 1 \%$, un ajustement à l'aide du modèle de Van Genuchten-Mualem par une valeur de paramètre q égale à 5,5.

À partir de cette étude, nous constatons qu'on ne peut généraliser une valeur constante de paramètre q pour l'ensemble des matériaux cimentaires et que pour le calcul de K_{rg} de chaque matériau (milieu poreux), le paramètre q doit être déterminé car il est influencé par la structure poreuse du matériau. Alors, le modèle de Van Genuchten-Mualem est non seulement influencé par le degré de saturation ; mais aussi par la nature du matériau étudié et sa porosité (réseau poreux) qui est principalement influencée par le rapport E/C .

VI.2.4. Calcul de K_{rg} à l'aide du modèle de Van Genuchten-Mualem pour des bétons à base des ciments de différentes classes de résistance mécanique

La Fig. VI-7 présente l'évolution de la perméabilité relative des bétons B32 et B35 en fonction de leurs degrés de saturation. Comme la seule différence entre les deux bétons

(B32 et B35) n'est que la classe de résistance mécanique des ciments utilisés, alors les résultats de la perméabilité relative obtenus en fonction du degré de saturation montrent, que l'on peut distinguer très légèrement entre les valeurs expérimentales des deux bétons seulement dans l'intervalle: $0.3 \leq S_l \leq 0.6$). Les résultats montrent aussi que la relation développée par Van Genuchten-Mualem (cf. Eq. (VI-3)) reste la plus appropriée pour la prédiction de $K_{r,g}$ en fonction de S_l de nos bétons ordinaires, avec un ajustement de q égal à 3.5 pour les deux bétons testés.

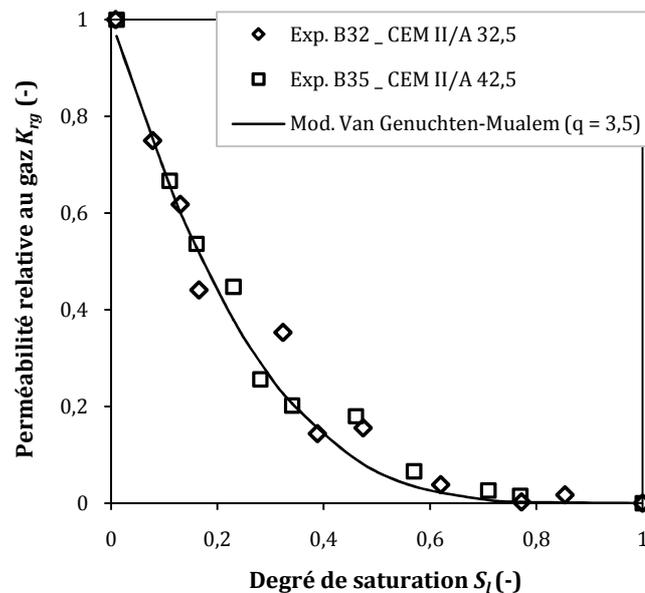


Fig. VI-7. Perméabilité relative au gaz des bétons B32 et B35 en fonction de la saturation. (Validation du modèle de Van Genuchten-Mualem ajusté avec un paramètre $q = 3.5$).

L'influence de la classe de résistance mécanique des ciments utilisés est donc négligeable sur la validité de l'expression analytique donnée par Van Genuchten-Mualem (avec un paramètre d'ajustement $q = 3.5$) pour la prédiction de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation des bétons B32 et B35.

VI.2.5. Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,g}$ pour des échantillons du béton de différentes tailles

L'évolution de la perméabilité relative au gaz des échantillons de différentes tailles du béton B35 en fonction de leurs degrés de saturation est présentée sur la Fig. VI-8. La validité des différentes relations analytiques existantes dans la littérature pour le calcul de $K_{r,g}$ en fonction de S_l a été vérifiée avec les résultats expérimentaux obtenus pour les trois séries d'échantillons de différents diamètres (5, 11 et 15 cm). Nous rappelons que les valeurs présentées sur les figures ci-dessous sont des moyennes arithmétiques de trois valeurs de perméabilité relative correspondant à trois échantillons testés pour chaque diamètre différents. Pour le modèle de Van Genuchten-Mualem, plusieurs ajustements ont été proposés par l'utilisation de différentes valeurs du paramètre q dans ce modèle.

Les résultats obtenus (cf. Fig. VI-8) montrent que plus l'échantillon du béton B35 est petit de taille, plus la modélisation tend à sous-estimer les perméabilités relatives mesurées en fonction de son degré de saturation. Pour les échantillons de 11 et 5 cm de diamètre, un

ajustement du modèle Van Genuchten-Mualem par un paramètre $q = 2.5$ est le plus approprié pour le calcul de $K_{r,g}$ des échantillons testés principalement quand $S_l \leq 0.3$, car les valeurs de perméabilité intrinsèque obtenues dans le cas de ces échantillons, de moyenne et petite taille, sont relativement plus élevées par rapport à celles obtenues dans le cas des échantillons de grande taille (de 15 cm de diamètre), principalement dans une gamme des S_l intermédiaires (plus de détails sont donnés en sections § IV.3 et § IV.4).

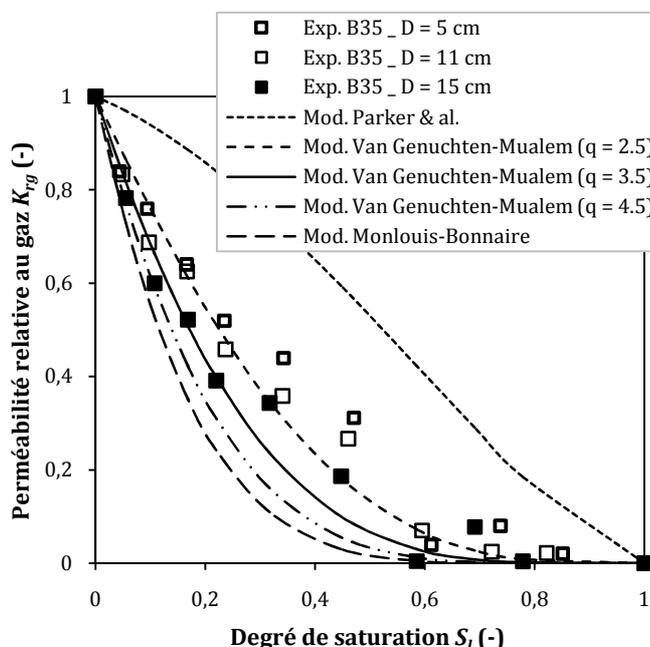


Fig. VI-8. Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,g}$ du béton B35 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.

On peut constater alors, que malgré l'influence légère de la taille de l'échantillon sur la mesure de perméabilité, plus le paramètre d'ajustement q est inférieur, plus le modèle de Van Genuchten-Mualem s'ajuste avec les données expérimentales obtenues dans le cas des échantillons de petite taille. Les relations proposées par Parker & coll. (1987) et Monlouis-Bonnaire (2004) ne s'ajustent qu'imparfaitement avec les résultats expérimentaux obtenus, surtout quand le taux de saturation du matériau est inférieur à 60 % (c.à.d. quand il y a une discontinuité entre les molécules d'eau dans le béton et les pores vides sont plus connectés dans le matériau).

La validité des différentes expressions analytiques pour la prédiction de la perméabilité relative au gaz des milieux poreux non saturés a été aussi vérifiée pour les bétons B30, B32 et B40 et pour des échantillons de différentes tailles. Les Figs. VI-9, VI-10 et VI-11 montrent l'évolution de leurs perméabilités relatives au gaz en fonction de S_l . Nous rappelons ici que pour le béton B30 et B32, nous n'avons testés que deux diamètres différents (15 et 11 cm).

Les résultats présentés sur la Fig. VI-9 montrent que la variation entre les évolutions de $K_{r,g}$ du béton B30 en fonction de S_l , mesurées dans les cas des deux diamètres différents ($D = 15$ et 11 cm), est très faiblement remarquée principalement quand la saturation du matériau s'approche de l'état sec ($0 \leq S_l \leq 0.25$), c.à.d. quand il y a une interconnexion entre les pores vides dans le matériau. La Fig. VI-9 montre aussi que la valeur du paramètre $q = 3.5$ est la plus appropriée dans un intervalle de saturation ($0 \leq S_l \leq 0.25$), pour le

calcul de la perméabilité relative en fonction de S_l à l'aide du modèle de Van Genuchten-Mualem pour les deux séries d'échantillons du béton B30 de différents diamètres. Cela indique que l'influence de la taille de l'échantillon testé est moins significative ou même négligeable quand la porosité ouverte du béton est élevée. Dans une gamme des S_l intermédiaires, une valeur du paramètre $q = 2.5$ est plus appropriée pour un ajustement du modèle de Van Genuchten-Mualem avec les résultats expérimentaux obtenus dans le cas des échantillons de 11 cm de diamètre.

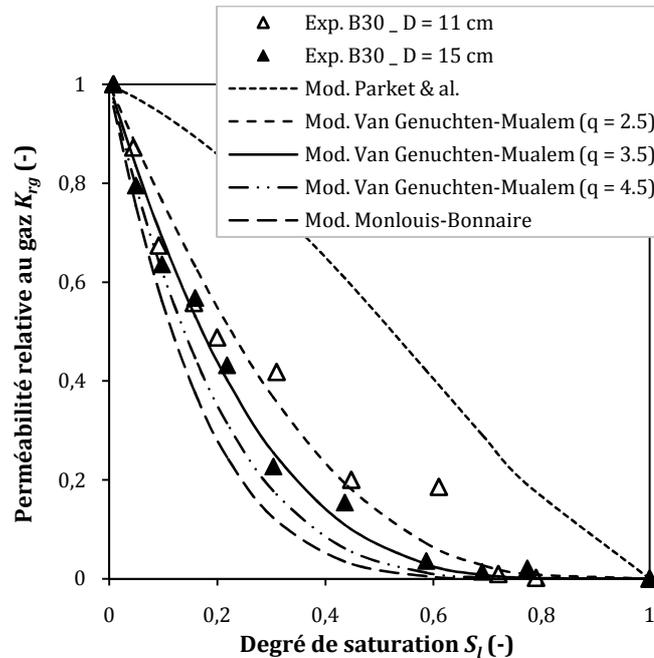


Fig. VI-9. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rg} du béton B30 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.

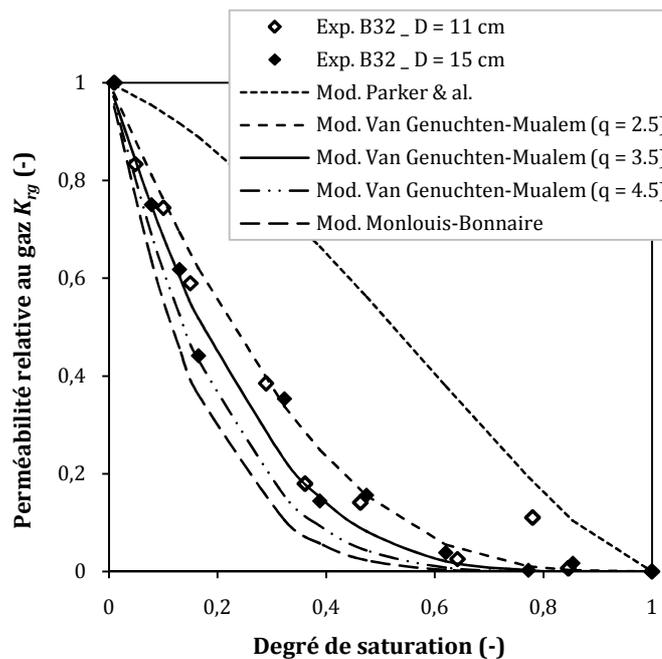


Fig. VI-10. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rg} du béton B32 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.

La Fig. VI-10 présente l'évolution de K_{rg} de deux séries d'échantillons du béton B32 avec deux différents diamètres (15 et 11 cm). Les résultats obtenus montrent que les valeurs de K_{rg} des corps d'épreuve de 15 cm de diamètre sont très légèrement inférieures à celles obtenues avec les corps d'épreuve de 11 cm de diamètre. Au-delà de 50 % de saturation ($S_l > 0.5$), les résultats de K_{rg} des deux séries d'échantillons du béton B32 se superposent presque. Ce résultat confirme alors le résultat obtenu dans le cas du béton B30 ; qu'il est difficile de distinguer entre les perméabilités relatives au gaz des deux séries d'échantillons de différentes tailles quand le matériau présente une porosité relativement élevée. Les résultats de la perméabilité relative au gaz du béton B32, obtenus avec les échantillons de 11 cm de diamètre, sont plus rapprochés du modèle de Van Genuchten-Mualem avec un ajustement par le paramètre $q = 2.5$, principalement dans un intervalle de degré de saturation intermédiaire (cf. Fig. VI-10). Alors, un compromis acceptable pour la valeur du paramètre d'ajustement q entre 2.5 et 3.5 (cf. Figs. VI-9 et VI-10) doit être trouvé pour le calcul de K_{rg} en fonction de S_l des deux séries d'échantillons de différents diamètres à l'aide de la relation de Van Genuchten-Mualem (cf. Eq. (VI-3)).

Dans le cas des deux bétons B30 et B32, la perméabilité relative au gaz est sous-estimée par l'expression analytique de Monlouis-Bonnaire (2004). La relation donnée par Parker *et coll* (1987) ne décrit toujours pas le comportement expérimental des bétons étudiés avec les différentes tailles des échantillons testés.

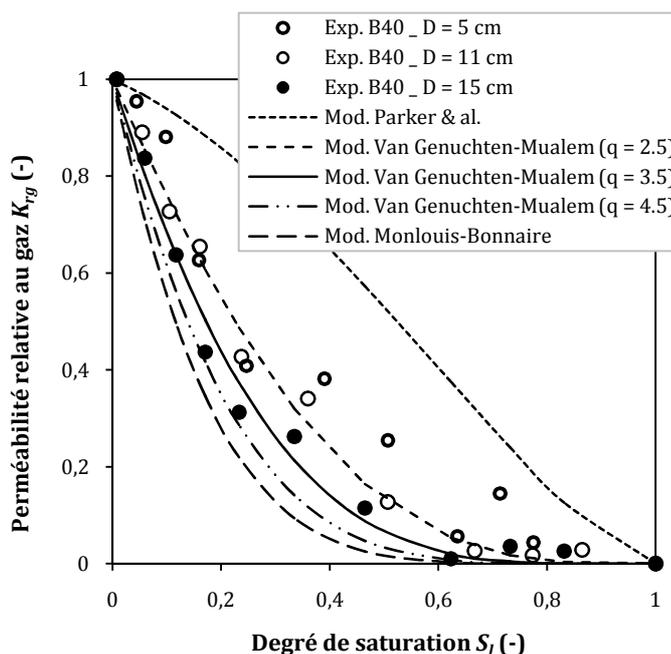


Fig. VI-11. Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rg} du béton B40 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.

On peut observer aussi à partir des Figs. VI-9 et VI-10 que la variation entre les valeurs de K_{rg} des échantillons de 15 cm de diamètre et celles des échantillons de 11 cm pour bétons B30 et B32, est moins significative par rapport aux résultats obtenus dans le cas du béton B35 ou B40 (cf. Fig. VI-8 et Fig. VI-11) qui montrent des porosités moins importantes par rapport aux bétons B30 et B32. Ce qui confirme que l'influence de la taille de l'échantillon sur les mesures de K_{rg} devient moins important quand la porosité du matériau testé

augmente (ces résultats sont discutés plus haut en sections § IV.3 et § IV.4). Dans le cas du béton B40 (cf. Fig. VI-11), le modèle de Van Genuchten-Mualem (1980) avec une valeur de $q = 3.5$ s'ajuste avec les résultats expérimentaux obtenus dans le cas des échantillons de 15 cm de diamètre, et il s'ajuste aussi presque parfaitement avec les données expérimentales des échantillons de 11 cm de diamètre mais avec une valeur de paramètre $q = 2.5$. Pour les échantillons de 5 cm de diamètre, la Fig. VI-11 montre qu'un ajustement de ce modèle doit être effectué avec une valeur de $q < 2.5$ pour le calcul de la perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation de ces petits échantillons. Nous pensons alors, que plus la taille de l'échantillon de ce béton B40 est petite, plus la valeur du paramètre q doit être relativement inférieure pour un ajustement du modèle de Van Genuchten-Mualem pour le calcul de K_{rg} du béton. Les paramètres d'entrée pour la modélisation à l'aide de la relation de Van Genuchten-Mualem, tels que le paramètre d'ajustement q , peuvent donc être influencés, non seulement par la nature du matériau et par sa structure poreuse, mais aussi par la taille de l'échantillon, principalement quand le béton est de faible porosité.

VI.3. Validation de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative à l'eau du béton

VI.3.1. Calcul de la perméabilité relative à l'eau par des modèles prédictifs

À partir de plusieurs études réalisées sur certains milieux poreux inertes et/ou sur les sols, des expressions analytiques pour le calcul de la perméabilité relative à l'eau (K_{rl}) en fonction de S_l ont été établies par Correy (1954) et rapporté par Maréchal et Beaudoux [MARÉ 92] (cf. Eq. (VI-4)); et par Fatt et Klikoff (1959) [FATT 59] et rapporté par Udell [UDELL 85] (cf. Eq. (VI-5)). Ainsi, DiCarlo (2003) [DiCa 03] propose une relation empirique (cf. Eq. (VI-6)) pour le calcul de K_{rl} en fonction de S_l du matériau. Van Genuchten [VAN-G 80] donne aussi une expression de la perméabilité relative à l'eau (cf. Eq. (VI-7)) où apparaît le paramètre m dérivé de l'expression analytique de la courbe de pression capillaire $P_c = P_c(S_l)$ (cf. § II.3.4 et Eq. (II-35)). Cette expression analytique basée sur les travaux de Mualem [MUAL 76], développée à l'origine pour les sols, est souvent admise dans la littérature pour prédire la conductivité hydraulique de la distribution statistique de la taille des pores.

Les résultats de la perméabilité relative à l'eau mesurée expérimentalement pour les quatre bétons étudiés, ainsi que les différentes relations empiriques (modèles) sont présentés sur les Figs. VI-12, VI-13, VI-14 et VI-15.

- Correy 1954 (cité par Maréchal 1992):

$$K_{rl} = ((S_l - 0,05)/(1 - 0,05))^4 \tag{VI - 4}$$

- Fatt et Klikoff 1959 (cité par Udell 1985):

$$K_{rl} = S_l^3 \tag{VI - 5}$$

- DiCarlo (2003):

$$K_{rl} = S_l^5 \tag{VI - 6}$$

- Van Genuchten-Mualem (1980)

$$K_{rl}(S_l) = S_l^q \left(1 - \left(1 - S_l^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (\text{VI} - 7)$$

Il a été nécessaire de proposer un ajustement de l'approche de la perméabilité relative à l'eau donnée par Van Genuchten-Mualem (Eq. (VI-7)) pour pouvoir effectuer une vérification de cette approche modifiée. En effet, avec une valeur de $m = 0.5$ (valeur moyenne des travaux de recherche trouvés dans la littérature (cf. Tab. II-2), l'expression proposée initialement pour les sols (avec $q = 0.5$) n'est pas en adéquation parfaite avec les résultats expérimentaux obtenus pour les différents bétons. Il semble aussi que l'ajustement proposé de cette relation avec $q = 4.5$ (Eq. (VI-7)) ne traduit pas les résultats de K_{rl} relatifs à nos matériaux cimentaires et donne une perméabilité relative à l'eau la plus petite (cf. Figs. VI-12, VI-13, VI-14 et VI-15).

Nous rappelons qu'il était impossible d'effectuer des mesures de perméabilité à l'eau sur le même échantillon testé à un degré de saturation donné à cause de la re-saturation du matériau en fin d'essai (cf. § III.9). Alors, pour chaque degré de saturation deux à trois échantillons du béton sont testés, dont leurs valeurs moyennes sont illustrées pour chaque degré de saturation sur les Figs. VI-12, VI-13, VI-14 et VI-15.

L'évolution de la perméabilité relative à l'eau en fonction de la saturation est présentée par des courbes concaves pour les quatre bétons étudiés, dont $K_{rl}(S_l) = 1$ quand le béton est saturé ($S_l = 1$) (cf. § V.4). En négligeant certaines valeurs de K_{rl} (certains points qui correspondent probablement à une surévaluation de K_l), les modèles de Correy (cf. Eq. (VI-4)) et de DiCarlo (cf. Eq. (VI-6)) semblent acceptables en ce qui concerne les résultats de la perméabilité relative à l'eau des bétons étudiés, en particulier pour le B35 et B40.

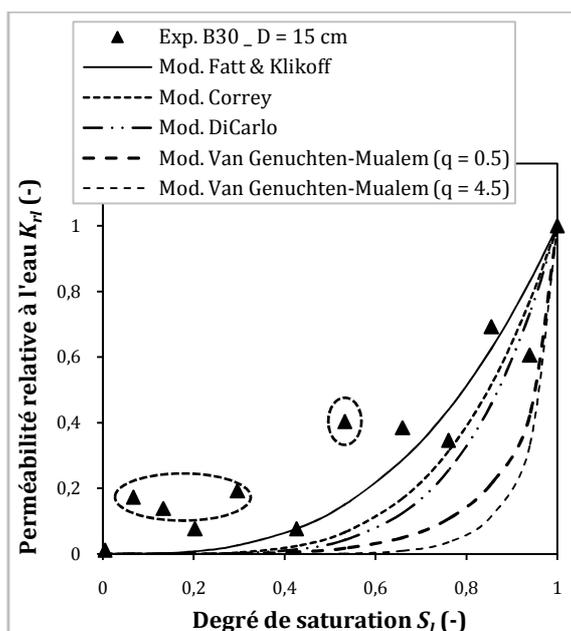


Fig. VI-12. Validation de la modélisation pour le calcul de K_{rl} en fonction de S_l pour le béton B30.

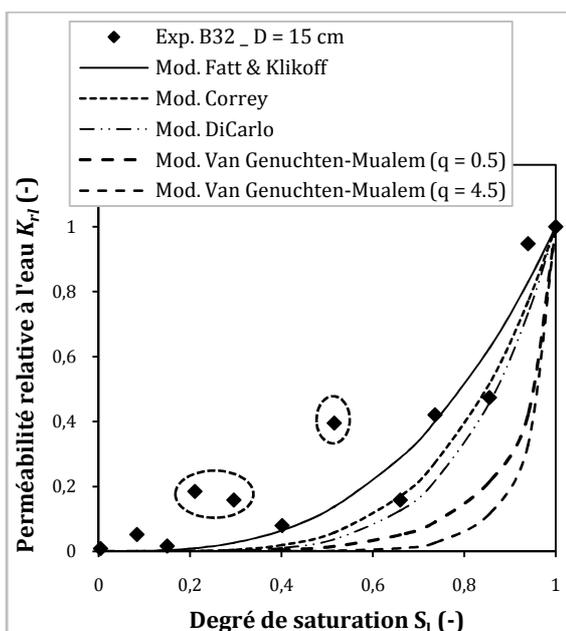


Fig. VI-13. Validation de la modélisation pour le calcul de K_{rl} en fonction de S_l pour le béton B32.

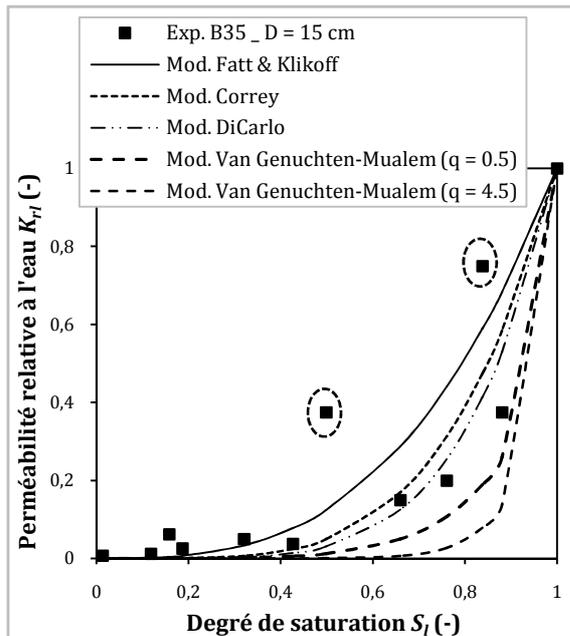


Fig. VI-14. Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,l}$ en fonction de S_l pour le béton B35.

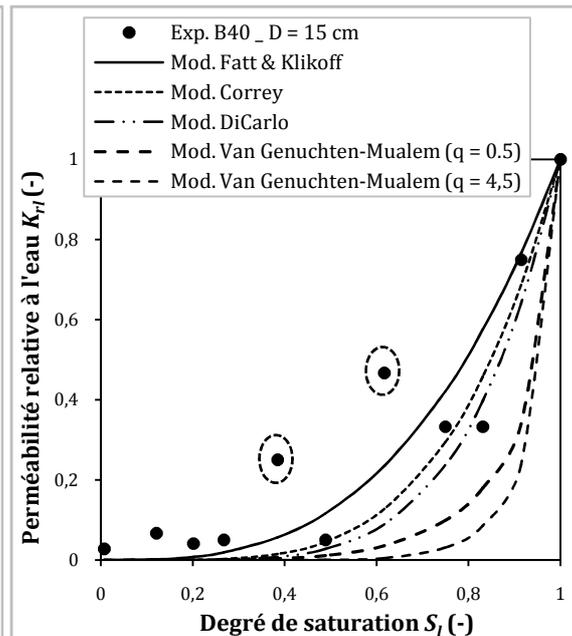


Fig. VI-15. Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,l}$ en fonction de S_l pour le béton B40.

Les résultats montrent que la modélisation tend à sous-estimer la perméabilité relative à l'eau lorsque la saturation est inférieure de 0,7. Ceci peut s'expliquer par une éventuelle inadéquation entre les coefficients intervenant dans la description théorique et ceux effectivement mesurés (résultat de la complexité des mécanismes physico-chimiques mis en jeu dans les expériences et de leur dépendance vis-à-vis de l'histoire hydrique de l'échantillon de béton [BARO 08]).

En effet, pour une gamme des S_l faibles (lorsque l'humidité relative devient faible), seule la diffusion gazeuse est possible (cf. § I.3.5.1). Dans ce cas, le transport (diffusif) de la vapeur d'eau gouverne le domaine des faibles valeurs de S_l . En revanche, dans le domaine des S_l intermédiaires, un minimum de K_l est observé expérimentalement. Ce minimum est cohérent avec la diminution des deux modes de transport et donc du transport global [BARO 07b]. Il correspond alors à la transition entre un transport dominé par un écoulement de Darcy (S_l élevés) et un transport dominé par la diffusion de la vapeur d'eau (S_l faibles), et résulte du fait que la diffusion de la vapeur augmente quand S_l diminue, compte tenu de la diminution du nombre de pores bloqués par la phase liquide discontinue.

VI.3.2. Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,l}$ des bétons de différents rapport E/C

L'évolution de la perméabilité relative à l'eau liquide des bétons B30, B35 et B40, calculée à l'aide des différents modèles prédictifs en fonction de leurs degrés de saturation, ainsi que les données expérimentales obtenues sont présentées sur la Fig. VI-16.

Malgré la différence notable du rapport E/C pour les bétons B30, B35 et B40, il est difficile de distinguer entre leurs perméabilités relatives (cf. Fig. VI-16). Ce qui confirme l'influence négligeable de la structure poreuse du béton ordinaire sur sa perméabilité relative à l'eau.

Afin d'estimer correctement la perméabilité relative, en particulier à des degrés de saturation élevés, à l'aide de modèles illustrés sur la Fig. VI-16, nous avons proposés une

modification de l'approche de la perméabilité relative à l'eau donnée par DiCarlo (2003) (cf. Eq. (VI-6)). La relation empirique du modèle modifié est donnée par l'Eq. (VI-8) et elle est mentionnée dans la légende sur la Fig. VI-16 par le Modèle de DiCarlo modifié.

$$K_{rl} = S_l^7 \quad (\text{VI} - 8)$$

Pourtant les résultats expérimentaux de K_{rl} obtenus à des faibles degrés de saturation ($0 \leq S_l \leq 0.5$) sont sous-estimés par les différents modèles présentés sur la Fig. VI-16, nous constatons que l'expression analytique de DiCarlo modifié (cf. Eq. (VI-8)) est la plus appropriée pour l'évaluation de K_{rl} en fonction de S_l des BO étudiés, principalement dans une gamme des S_l élevée.

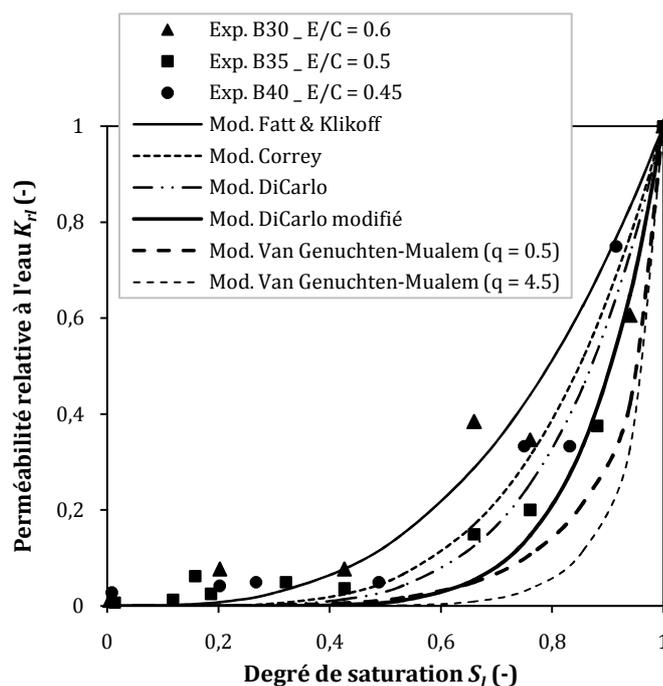


Fig. VI-16. Perméabilité relative à l'eau liquide en fonction de S_l pour les bétons B30, B35 et B40.

VI.3.3. Évaluation de K_{rl} à l'aide des modèles prédictifs pour des bétons à base des ciments de différentes classes de résistance mécanique

La perméabilité relative à l'eau du béton B32 est légèrement plus grande que celle du béton B35 en particulier pour les degrés de saturation intermédiaire. En effet, les deux ciments utilisés sont du même type mais de classes de résistance différentes. Cette légère variation est due à la légère différence entre les propriétés physico-chimiques des deux ciments, en particulier leur finesse de mouture (surface spécifique Blaine) qui peut influencer la porosité du matériau (cf. Fig. IV-30). La perméabilité relative à l'eau en fonction de la saturation donne une courbe concave pour les deux bétons qui peut être modélisée correctement par les modèles de DiCarlo (cf. Eq. (VI-6)) et de DiCarlo modifié (cf. Eq. (VI-8)). Les courbes obtenues par les relations proposées par Correy (cf. Eq. (VI-4)) et par Fatt & Klikoff (cf. Eq. (VI-5)) montrent que ces modèles ne décrivent pas correctement le comportement expérimental du béton partiellement saturé. Les résultats obtenus montrent aussi que plus le paramètre d'ajustement q dans le modèle de Van Genuchten-Mualem est grand, plus les valeurs de la perméabilité relative à l'eau, calculées par ce modèle en fonction de la saturation, ne s'ajustent qu'imparfaitement avec les données expérimentales.

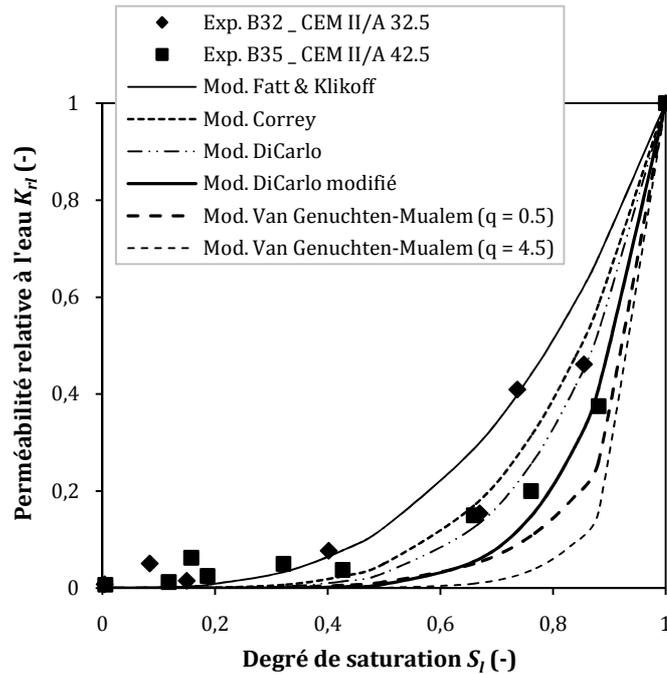


Fig. VI-17. Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,l}$ en fonction de S_l des bétons B32 et B35 à base des ciments de différentes classes de résistance mécanique.

VI.3.4. Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,l}$ des échantillons du béton de différentes tailles

Les courbes illustrées sur la Fig. VI-18 montrent qu'il est difficile de distinguer entre les évolutions de la perméabilité relative à l'eau en fonction de la saturation, obtenues pour les deux séries d'échantillons de tailles différentes (11 et 15 cm de diamètre).

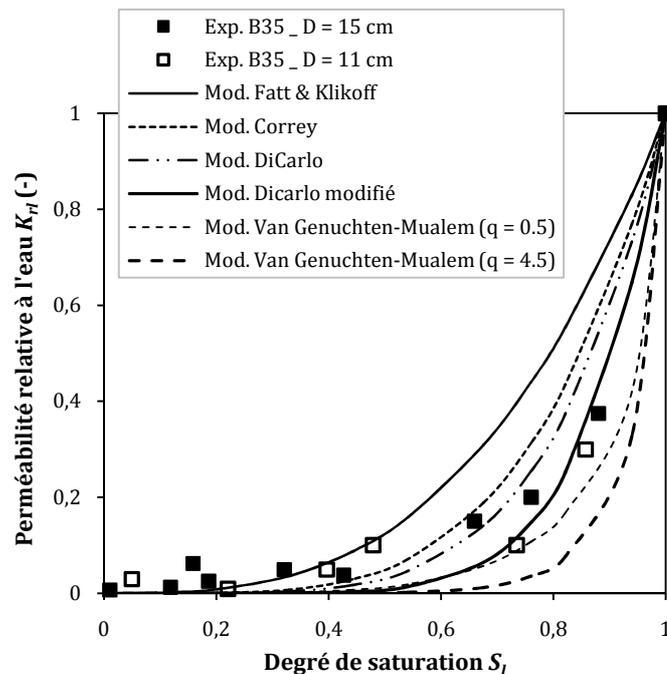


Fig. VI-18. Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,l}$ du béton B35 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.

Malgré que les résultats de $K_{r,l}$ calculés par l'ensemble des modèles testés montrent une sous-estimation de la modélisation dans une gamme des S_l faible ($S_l \leq 0.5$), l'ajustement proposé pour le modèle de DiCarlo modifié (cf. Eq. (VI-8)) semble satisfaisant pour l'évaluation de la perméabilité relative à l'eau des échantillons de différentes tailles, principalement dans une gamme de degré de saturation élevée ($S_l > 0.5$) (cf. Fig. VI-18). La taille de l'échantillon a donc une influence négligeable sur l'évolution de $K_{r,l}$ en fonction de S_l , et nous considérons donc que le modèle de DiCarlo modifié est le plus approprié pour la prédiction de la perméabilité relative à l'eau des échantillons de différentes tailles.

L'expression analytique donnée par Van Genuchten-Mualem (1980) pour le calcul de $K_{r,l}$ en fonction de S_l (cf. Eq. (VI-7)), tend à sous-estimer le comportement expérimental du béton ordinaire étudié (B35) pour les différentes tailles d'échantillons testés, principalement quand la valeur du paramètre d'ajustement q augmente.

VI.4. Conclusions

Les modèles prédictifs existants dans la littérature pour l'évaluation de la perméabilité relative des milieux poreux partiellement saturé, à l'origine développés pour les sols, ne s'ajustent qu'imparfaitement avec le comportement expérimental des bétons ordinaires étudiés. Des ajustements pour certaines expressions analytiques ont été donc proposés pour une modélisation correcte de l'évolution de la perméabilité relative au gaz et à l'eau du béton en fonction de son degré de saturation.

La perméabilité relative au gaz ($K_{r,g}$) diminue lorsque le degré de saturation augmente. Elle montre une courbe concave en fonction de la saturation, qui peut être modélisée par le modèle de Van Genuchten-Mualem avec un ajustement de paramètre $q = 3,5$ au lieu de $q = 0,5$ (valeur admise pour les sols non saturés). Cependant, les résultats obtenus montrent que le paramètre $q = 2.5$ est le plus approprié pour des échantillons de moyen et petit diamètres (11 et 5 cm) principalement quand $S_l \leq 3$. On peut donc conclure que le paramètre " q " dépend non seulement de la structure poreuse du matériau ; mais aussi de la taille de l'échantillon testé.

Les relations proposées par Parker & coll. (1987) et Monlouis-Bonnaire (2004) ne décrivent pas le comportement expérimental du béton partiellement saturé, surtout quand le taux de saturation du matériau est inférieur à 60 % (c.à.d. quand il y a une discontinuité entre les molécules d'eau dans le béton et les pores vides sont plus connectés dans le matériau).

En outre, l'évolution de la perméabilité relative au gaz d'un béton séché à 80° C est sous-estimée par le modèle de Van Genuchten-Mualem (1980) avec un paramètre d'ajustement $q = 3.5$, principalement quand $S_l \geq 0.3$. Donc, dans cette gamme de saturation, plus la température de séchage est élevée, plus le paramètre d'ajustement q utilisé pour l'évaluation de $K_{r,g}$, diminue.

Le modèle de Van Genuchten-Mualem tend à sous-estimer $K_{r,g}$ quand la saturation du béton augmente. Notons que la différence entre les perméabilités relatives au gaz des bétons étudiés, pour différents rapports E/C , est non remarquable (cf. Fig. VI-6), ainsi que l'évolution de $K_{r,g}$ en fonction de la saturation du béton B32, à base du ciment CEM II/A 32,5 est légèrement supérieur à celle du béton B35 à base du ciment CEM II/A 42,5. Les données expérimentales des quatre bétons peuvent donc être modélisées par le même modèle ajusté

de Van Genuchten-Mualem (modifié avec une valeur de paramètre q égal à 3,5), car la distribution bimodale de la porosité est très rapprochée entre les quatre bétons étudiés.

Les résultats de la modélisation pour l'évaluation de la perméabilité relative au gaz des échantillons de différentes tailles, montrent qu'un ajustement du modèle Van Genuchten-Mualem (cf. Eq. (VI-3)) par un paramètre $q = 2.5$ est le plus approprié pour le calcul de K_{rg} des échantillons de moyen et petit diamètres (11 et 5 cm) principalement quand $S_l \leq 3$. Cela est plus remarqué quand le béton est de faible porosité. Dans une gamme intermédiaire de S_l , plus l'échantillon est petit, plus la modélisation tend à sous-estimer la perméabilité relative au gaz du béton. Ceci nous laisse penser que la teneur en eau des gros échantillons est moins homogène par rapport aux petits échantillons qui peuvent être plus influencés par un même séchage appliqué sur l'ensemble des échantillons de différents diamètres, ainsi que cet effet de taille des corps d'épreuve peut être plus remarqué dans le cas d'un BHP (béton de faible porosité). Pour ce mode de séchage suivi dans cette étude, on peut conclure que le paramètre de Van Genuchten " q " dépend non seulement de la structure poreuse du matériau mais aussi de la taille de l'échantillon testé.

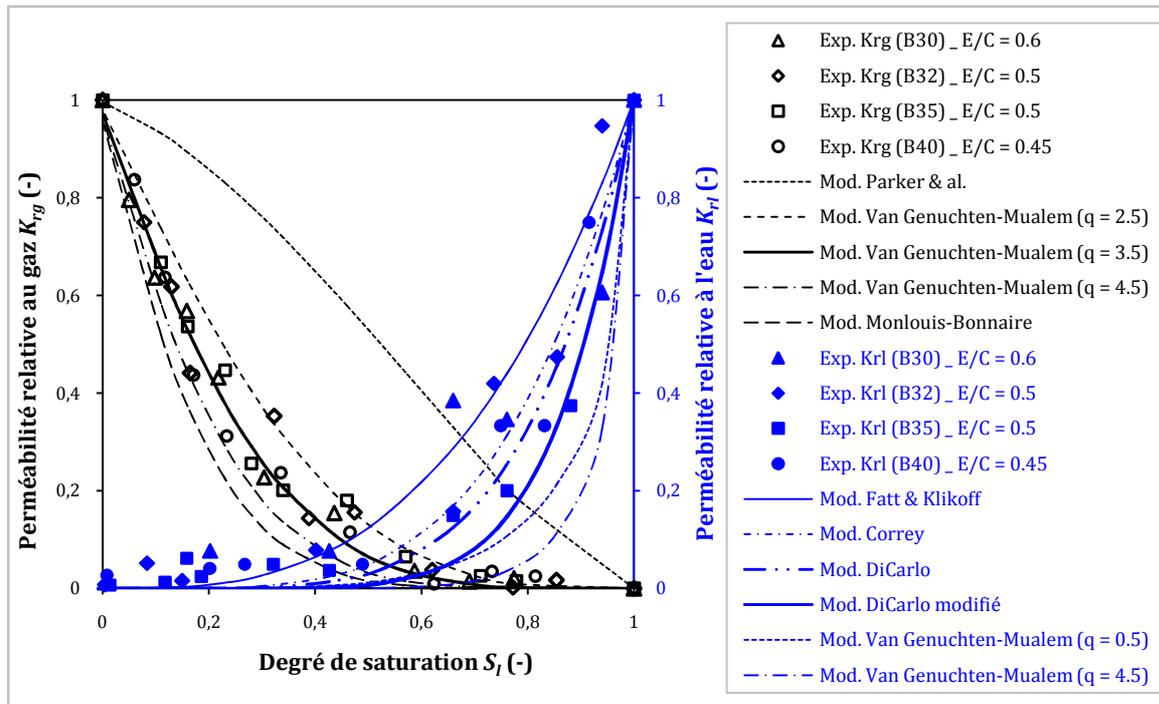


Fig. VI-19. Évolution des perméabilités relatives au gaz et à l'eau liquide des bétons B30, B32, B35 et B40 en fonction de leurs degrés de saturation.

Pour chaque béton testé, une courbe de perméabilité relative à l'eau liquide en fonction de la saturation ($K_{rl} = K_{rl}(S_l)$) a été déterminée. Les résultats indiquent que la modélisation tend à sous-estimer la perméabilité relative à l'eau lorsque la saturation est $< 0,6$.

Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la perméabilité relative à l'eau liquide des bétons étudiés en fonction de S_l peut être modélisée par la relation proposée par DiCarlo (2003) pour les sols non saturés (cf. Eq. (VI-6)). Malgré que la modélisation tend à sous-estimer la perméabilité relative à l'eau dans un intervalle de S_l entre 0 et 0,6, ce modèle est considéré comme le plus approprié pour les bétons ordinaires étudiés avec un

ajustement du paramètre $m = 7$ (modèle de DiCarlo modifié (cf. Eq. (VI-8)) au lieu de $m = 5$ dans le modèle de DiCarlo (2003) (cf. Fig. VI-17). Le modèle de Van Genuchten-Mualem (cf. Eq. (VI-7)) représente une sous-estimation des valeurs expérimentales de la perméabilité relative à l'eau liquide pour les différents degrés de saturation principalement quand la valeur du paramètre q augmente. Par contre, les modèles de Corey et de Fatt & Klikoff tendent à surestimer K_{rl} dans une gamme de saturation entre 0,6 et 1. Ils ne décrivent pas correctement le comportement des bétons ordinaires étudiés en fonction de la saturation.

Par ailleurs, l'influence de la taille (de diamètre) de l'échantillon a été vérifié dans le cas du béton B35 en utilisant deux diamètres différents seulement (15 et 11 cm). Les résultats montrent que l'influence du diamètre de l'échantillon n'est pas significative sur la mesure de la perméabilité à l'eau liquide. L'ajustement proposé pour le modèle de DiCarlo (DiCarlo modifié (cf. Eq. (VI-8))) est donc acceptable pour l'évaluation de K_{rl} en fonction de la saturation des échantillons de différentes tailles (différents diamètres).

Conclusion générale

Depuis une quinzaine d'années, les approches performantielles ont été développées pour évaluer la durabilité des bétons. Alors, des modèles classiques qui prennent en compte le béton comme un matériau saturé ont été beaucoup étudiés. Cependant, le matériau béton connaît des fluctuations dans son niveau d'humidité dans le temps et selon le milieu environnant. En effet, dans la littérature, les études expérimentales soulignant l'effet du taux de saturation du béton sur la variation de la perméabilité, principalement à l'eau, sont rares. Ces résultats sont susceptibles d'être introduits dans des modèles de prévision des transferts dans les bétons et de prédiction de la durabilité des ouvrages.

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette problématique, notre étude s'est basée sur une approche principalement expérimentale qui a été consacrée à la mesure de la perméabilité relative au gaz et à l'eau liquide de bétons ordinaires partiellement saturés. On s'intéresse aussi, dans cette étude, à la validation des modèles existants (à l'origine développés pour les sols non saturés) pour la prédiction de la perméabilité relative des bétons ordinaires en fonction de la saturation. L'originalité de cette étude provient de l'utilisation des échantillons du béton de différents diamètres dans le but d'identifier l'influence de la taille de l'échantillon sur la mesure de perméabilité. Nous avons donc aboutis aux conclusions suivantes :

- Suite à une vérification de la nature de l'écoulement du gaz, pendant l'essai de la perméabilité CEMBUREAU, un écoulement laminaire du gaz à travers le béton, à différents degrés de saturation, est assuré. Donc à partir des perméabilités apparentes mesurées à différentes pressions d'admission, l'approche de Klinkenberg a été utilisée pour la détermination de la perméabilité intrinsèque (K_{int}), qui est indépendante de la pression moyenne appliquée et liée seulement à l'écoulement purement visqueux.
- La contribution de l'écoulement non-visqueux (déterminé par l'approche de Klinkenberg) dans l'écoulement total du gaz, est nettement influencée par le degré de saturation du béton et de la pression moyenne appliquée. L'écoulement non-visqueux (moléculaire) diminue lorsque la saturation en eau augmente, en raison de la continuité entre les molécules d'eau. Sa contribution diminue lorsque la pression appliquée est plus importante. Cela peut être expliqué par le fait que seulement les pores les plus grands, qui sont vidés dans un premier temps par le séchage, sont percolés par le gaz lorsque la pression moyenne du gaz (P_m) appliquée sur le béton est relativement faible. Mais quand la pression moyenne est élevée, l'azote gazeux peut percoler les pores les plus grands et les plus petits qui présentent plus d'humidité à l'intérieur. Donc, pour un degré de saturation donné (ou humidité relative), la taille des pores séchés dans un béton influence la contribution de l'écoulement moléculaire (non-visqueux) dans l'écoulement total du gaz, qui permet d'expliquer l'augmentation de cette contribution de l'écoulement moléculaire avec la quantité décroissante de l'humidité à l'intérieur du réseau poreux.
- Dans le but de quantifier la durabilité du béton, le coefficient de perméabilité intrinsèque peut alors être le meilleur paramètre pour la caractérisation d'un béton, par rapport au coefficient traditionnel de perméabilité Darcy, car la perméabilité intrinsèque est indépendante des propriétés du fluide percolant (viscosité et

compressibilité) et du gradient de pression appliqué. Elle est seulement une caractéristique du milieu poreux. En outre, la pente de la droite de Klinkenberg ($\beta \cdot K_{int}$), selon le taux de saturation, donne une caractérisation complète du béton testé. Elle permet de calculer la perméabilité apparente du béton à une pression moyenne différente de celle utilisée pour la mesure à partir de l'Eq. (II-24).

- La perméabilité au gaz est fortement dépendante du degré de saturation du béton. L'augmentation de K_{int} est très lente quand les échantillons du béton sont presque saturés et devient notamment plus rapide quand ils sont proches de l'état sec. La continuité entre les molécules d'eau dans le réseau poreux du béton empêche le passage du gaz et par conséquent, la perméabilité au gaz augmente quand le degré de saturation diminue. Les résultats montrent que les courbes complètes des données expérimentales peuvent ainsi être estimées correctement à l'aide d'une fonction logarithmique. Une relation empirique entre la perméabilité intrinsèque et le degré de saturation a été donc déterminée pour chaque béton (cf. Figs. IV-11, IV-12, IV-13 et IV-14). Nous avons constatés qu'il est impossible d'établir une seule et même loi pour tous les bétons ordinaires étudiés.
- La perméabilité relative au gaz (K_{rg}) diminue lorsque le degré de saturation augmente. Elle montre une courbe concave en fonction de la saturation, qui peut être présenté correctement par une relation empirique (logarithmique ou polynomiale) en fonction de la saturation. Dans un intervalle restreint du degré de saturation ($0 \leq S_l \leq 0.25$) la perméabilité relative au gaz des BO étudiés diminue rapidement pour atteindre une valeur d'environ 30 % de K_{rg} mesurée à l'état sec (à $S_l = 0$). Au-delà d'un degré de saturation égal à 0.6, la perméabilité relative au gaz tend vers des valeurs très faibles et quasiment nulles.
- Les différents protocoles de séchage suivis ont couvert l'ensemble des degrés de saturation (de l'état saturé à l'état sec) pour le type des bétons étudiés (BO). Le pré-conditionnement appliqué (séchage par palier pendant 24 h à 60° C et pendant 48 h à 80° C) a donc une grande influence sur la mesure de perméabilité. Nous pensons qu'un séchage à 80° C peut légèrement modifier la microstructure du béton et augmente par conséquent, la perméabilité du matériau par rapport à un séchage à 60° C. Une relation logarithmique entre K_{int} et S_l a donc été déterminée pour chaque procédure de séchage. L'évolution de la perméabilité relative au gaz du béton B35 séché à 80° C par palier de 48 h en fonction de la saturation est relativement supérieure à celle du béton séché à 60° C par palier de 24 h, principalement à une gamme des S_l intermédiaires. Ceci peut être expliqué par le fait que plus de pores sont vidés et interconnectés dans cet intervalle de S_l par un séchage à 80° C par rapport à un séchage à 60° C. La méthode de séchage par paliers est donc efficace pour des bétons relativement poreux. Mais la durée des paliers doit être adaptée à chaque béton et certainement largement prolongée pour des bétons à très hautes performances.
- La perméabilité au gaz du béton est également dépendante de ses paramètres de formulation, principalement du rapport E/C . Plus ce rapport est élevé, plus la perméabilité au gaz est grande. Car l'augmentation du rapport E/C conduit à augmentation de la porosité ouverte du béton. La perméabilité du béton est donc

fortement dépendante de sa structure poreuse du matériau. Des analyses microstructurales effectuées sur tous les bétons étudiés confirment ce résultat. En outre, la teneur en volume global des graviers, ainsi que leurs tailles (dimensions des granulats), sont des facteurs importants qui peuvent influencer la perméabilité aux gaz du béton en raison d'une zone poreuse située autour des granulats, dite zone de transition interfaciale (phase ITZ), dont, l'épaisseur de cette zone augmente avec le diamètre du granulats. La taille et la distribution des tailles des pores dans le béton peuvent être aussi influencées par les caractéristiques physico-chimiques du liant (ciment) utilisé, tel que sa finesse de mouture. Par ailleurs, une légère influence de la classe de résistance mécanique des ciments utilisés sur la structure poreuse du matériau peut conduire à une légère modification de sa perméabilité. Le ciment portland CEM II/A 32,5 donne des perméabilités au gaz légèrement élevées par rapport à celles obtenues dans le cas du ciment CEM II/A 42,5. Il est important de dire que pour chaque formulation du béton et donc pour chaque structure poreuse différente, une relation empirique pour le calcul de la perméabilité intrinsèque au gaz en fonction de la saturation peut être établie.

- Dans ce travail de thèse, des échantillons du béton de différentes tailles ont été testés. Les résultats obtenus montrent que plus la taille de l'échantillon est grande, plus sa perméabilité au gaz est relativement plus faible. Une des explications de ce comportement peut être liée au séchage, qui peut être plus destructif pour un échantillon de petit volume lorsque les échantillons sont soumis au transfert de chaleur. Ce qui explique la plus grande perméabilité pour le plus petit échantillon. Par conséquent, pour ce mode de séchage utilisé (séchage à une température inférieure à 105° C), la taille de l'échantillon est un paramètre important dans l'évaluation de la perméabilité du béton. Nous pensons, qu'en utilisant des températures plus élevées (105° C par exemple), l'influence du diamètre de l'échantillon peut être négligée.
- Les résultats de similitude montrent que l'évolution de K_{rg} en fonction de S_l des quatre bétons ordinaires étudiés peut être modélisée par le modèle de Van Genuchten-Mualem (1980) -à l'origine développé pour les sols non saturés- avec un ajustement du paramètre $q = 3,5$ au lieu de $q = 0,5$ (valeur admise pour les sols). À partir des courbes obtenues, la modélisation tend à sous-estimer la perméabilité relative au gaz quand la saturation du béton augmente ($S_l \geq 0.6$), mais nous considérons que la relation empirique donnée par Van Genuchten-Mualem (1980), avec $q = 3.5$, s'ajuste presque parfaitement avec les résultats expérimentaux de tous les BO étudiés, principalement lorsque $S_l < 0.3$. Cependant, les résultats obtenus montrent que le paramètre $q = 2.5$ est meilleur pour des échantillons séchés à 80° C, principalement pour la gamme des S_l intermédiaires ainsi que pour des échantillons de moyen et petit diamètres (11 et 5 cm) principalement quand $S_l \leq 0.3$. Pourtant l'influence du diamètre de l'échantillon n'est pas très significative sur la mesure de la perméabilité ; mais il est remarquable, principalement dans une gamme intermédiaire des S_l , que plus l'échantillon est de petit volume, plus la modélisation tend à sous-estimer la perméabilité relative au gaz du béton. Ce résultat est plus remarqué quand la porosité du béton diminue. Ce qui nous laisse penser que la teneur en eau est plus homogène dans un petit échantillon que dans un grand, ainsi que dans un béton d'une porosité élevée que dans un béton de porosité

faible. On peut donc conclure que le paramètre " q " dépend non seulement de la structure poreuse du matériau ; mais aussi de la procédure du séchage du béton (le préconditionnement) et de la taille de l'échantillon testé. Notons que la différence entre les perméabilités relatives au gaz des bétons étudiés, pour différents rapports E/C , est non remarquable. Les expressions analytiques proposées par Parker & coll. (1987) et Monlouis-Bonnaire (2004) ne s'ajustent qu'imparfaitement avec les résultats expérimentaux obtenus, surtout quand le taux de saturation du matériau est inférieur à 60 % (c.à.d. quand il y a une discontinuité entre les molécules d'eau dans le béton et les pores vides sont plus connectés dans le matériau).

Dans le monde de l'ingénierie civile, la perméabilité à l'eau semble pratiquement, dans de nombreux cas, la plus représentative du matériau en service. Cependant, la perméabilité à l'eau du béton est difficile à mesurer. Pour des problèmes d'infiltration sous forme liquide, il faut souvent suffisamment du temps pour que tous les pores soient saturés en eau. La perméabilité à l'eau liquide peut facilement être évaluée par une mesure directe pour des matériaux cimentaires relativement perméables comme le béton ordinaire, mais le principal inconvénient de la mesure à l'eau réside dans le fait que l'eau n'est pas complètement inerte par rapport à la pâte de ciment. Par ailleurs, une durée plus longue pour l'essai de la perméabilité à l'eau représente un inconvénient majeur, voir même un obstacle contre une mesure réelle de perméabilité dans le cas d'un béton partiellement saturé à cause de la re-saturation du matériau pendant l'essai. Alors, nous avons proposé dans cette étude que la mesure de la perméabilité à l'eau liquide soit réalisée en régime transitoire (non stationnaire), effectuée par des tests plus rapides de quelques heures sur des éprouvettes moins épaisses. Nous avons montrés qu'après 6 heures d'essai (d'application d'eau sous pression de 3 bars), une mesure directe de la perméabilité à l'eau des bétons ordinaires, fournie des résultats proches de la vraie perméabilité à l'eau des échantillons partiellement saturés.

- La perméabilité à l'eau liquide (K_l) du béton est fortement influencée par le degré de saturation (S_l). Contrairement au cas de la perméabilité au gaz, la perméabilité à l'eau augmente avec le degré de saturation. Dans la gamme de S_l entre 0 et 0,5 la perméabilité à l'eau liquide reste très faible. Ceci est expliqué par le fait que, dans cet intervalle du degré de saturation, la phase liquide est déconnectée (des "îlots" liquide), et par conséquent, aucun transport "Darcien" sous forme liquide, ne peut avoir lieu. Au-delà d'un degré de saturation égal à 0,6, la perméabilité à l'eau liquide augmente fortement avec S_l . En effet, ce phénomène de la diminution de la perméabilité à l'eau du béton avec son degré de saturation est expliqué par la relation liant la pression capillaire à la saturation liquide (cf. § 1.2.4). C'est généralement une courbe monotone décroissante du degré de saturation. Quand la saturation en eau décroît, la pression capillaire devient trop élevée pouvant être infinie. Ce qui empêche la pénétration de l'eau sous pression dans le matériau dans une gamme des S_l faibles.
- Les résultats expérimentaux de la perméabilité intrinsèque à l'eau liquide (mesuré à $S_l = 1$) peuvent être comparés avec celles de la perméabilité intrinsèque au gaz (mesuré à $S_l = 0$). Les perméabilités intrinsèques au gaz sont d'un ordre de grandeur de 10^{-16} m^2 pour les bétons B30, B32 et B35 et d'un ordre de grandeur de 10^{-17} m^2 pour le béton de

site B40, pendant que les perméabilités intrinsèques à l'eau des mêmes bétons sont respectivement d'un ordre de grandeur de 10^{-17} et de 10^{-18} m². La perméabilité intrinsèque mesurée au gaz est donc supérieure à la perméabilité mesurée à l'eau ($K_{int} > K_l$). Ceci est dû au fait que divers phénomènes physico-chimiques peuvent survenir pendant les essais. Les réseaux poreux impliqués dans le transport sont différents si le gaz ou l'eau migre dans le matériau. La réactivité de l'eau avec le matériau béton, conduit aussi à une sous-évaluation de la perméabilité à l'eau. Nous pensons que cette influence est limitée par les essais rapides effectués dans ce travail de recherche (prise de mesure après 6h du début de l'essai), car les valeurs des perméabilités mesurées à l'eau et au gaz sont proches. La différence entre les valeurs des perméabilités au gaz et à l'eau liquide, aurait pu être de deux ordres de grandeur si l'essai de perméabilité à l'eau dure plus longtemps. Cependant le fait que la saturation de l'échantillon soit alors souvent incomplète, constitue un autre facteur de sous-évaluation de la perméabilité à l'eau.

- Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de caractériser chaque béton par une courbe de la perméabilité intrinsèque à l'eau en fonction du degré de saturation. Ces courbes peuvent être estimées correctement en utilisant une fonction exponentielle. Dans ce travail de thèse, une relation empirique, décrivant le comportement de K_l en fonction de la saturation, a été déterminée pour chaque béton étudié (cf. Figs. V-9, V-10, V-11 et V-12). Par ailleurs, la perméabilité relative à l'eau peut être déduite pour les quatre BO étudiés. Son évolution donne une courbe concave en fonction de la saturation avec une valeur maximale de K_{rl} quand le matériau est complètement saturé (à $S_l = 1$). Il est observé à partir des courbes obtenues que K_{rl} peut être corrélée avec le degré de saturation (S_l) du matériau. Les données expérimentales de K_{rl} peuvent être estimées correctement, en utilisant une fonction exponentielle pour tous les bétons étudiés.
- La perméabilité à l'eau du béton est également dépendante de sa structure poreuse qui peut être influencée par des paramètres de formulation, tels que le rapport E/C , le volume des granulats, ainsi que la taille des granulats utilisés. Les résultats montrent que plus le rapport E/C est élevé, plus la perméabilité à l'eau est importante, car la porosité accessible à l'eau du matériau augmente avec l'augmentation de rapport E/C . En outre, une influence non-significative de la classe de résistance mécanique des ciments utilisés est observée sur la perméabilité à l'eau du béton. Le ciment portland CEM II/A 32,5 donne des perméabilités à l'eau très légèrement élevées par rapport à celles obtenues dans le cas du ciment CEM II/A 42,5. Ceci est expliqué par les structures poreuses (distribution des tailles des pores) des deux bétons (B32 et B35) qui sont très rapprochées et presque identiques. Nous constatons que l'influence de ces paramètres de formulation et par conséquent de la structure poreuse du matériau, est moins significative sur sa perméabilité intrinsèque à l'eau que sur sa perméabilité intrinsèque au gaz.
- La perméabilité à l'eau mesurée à l'aide de la méthode de Valenta (1970), qui prend en compte le temps de l'essai et la porosité du matériau (basée sur des mesures de la profondeur de pénétration de l'eau dans le béton pendant un temps t), donne des valeurs de perméabilité légèrement plus faibles par rapport à la méthode utilisée avec

l'ensemble des échantillons testés dans cette étude. Pour le béton B35 à environ 65 % de saturation, les deux perméabilités comparées (des deux méthodes), sont du même ordre grandeur ($E-18 \text{ m}^2$).

- L'étude de l'effet de la taille (de diamètre) de l'échantillon, vérifié dans le cas du béton B35, montre que l'influence du diamètre de l'échantillon n'est pas significative sur la mesure de la perméabilité à l'eau liquide. Les courbes correspondant à l'évolution de K_l en fonction de S_l , pour les deux séries d'échantillons de différents diamètres, sont presque identiques. Suivant la méthode de Valenta (1970) -basée sur des mesures de la profondeur de pénétration de l'eau dans l'échantillon du béton- l'influence de la taille de l'échantillon reste toujours négligeable sur la mesure de la perméabilité à l'eau. Cette méthode de Valenta est donc valable pour le calcul de la perméabilité à l'eau du béton, mais son application peut conduire à certaines erreurs, car elle est basée sur la porosité du matériau qui peut être non représentative de l'échantillon testé. De plus, la saturation complète de l'échantillon volumineux d'un élancement de 1 (de 15 cm de hauteur par exemple) est difficile ce qui peut conduire à une surévaluation du degré de saturation.
- Le calcul de la perméabilité par la méthode de Katz-Thompson II, représente une dernière partie dans cette étude. Les valeurs des perméabilités obtenues par ce modèle sont plus faibles que celles obtenues expérimentalement. La relation Katz-Thompson II ne peut être validée pour une évaluation correcte de la perméabilité du béton, car ce modèle est basé seulement sur la distribution porale dans le matériau, déterminée par des essais de porosimétrie au mercure, pour lesquels, on utilise de petits échantillons que nous considérons non représentatifs du béton étudié. En effet, l'échantillon testé en porosimétrie au mercure ne représente que la partie mortier dans le béton et ce modèle ne prend pas en considération la tortuosité et la constrictivité des pores dans le béton.
- Les résultats de similitude montrent une forte influence de S_l sur la perméabilité relative à l'eau qui peut être modélisée par le modèle proposé par DiCarlo (2003) pour les sols non-saturés (cf. **Eq. (VI-6)**). Malgré que la modélisation tend à sous-estimer la perméabilité relative à l'eau lorsque la saturation est < 0.6 , ce modèle est considéré comme le plus approprié, principalement pour une gamme des S_l élevés et avec un ajustement du paramètre $m = 7$ (modèle de DiCarlo modifié) au lieu de $m = 5$ dans le modèle de DiCarlo (2003) (cf. **Fig. VI-19**). L'expression analytique donnée par Van Genuchten-Mualem (1980) souvent admise pour les sols non saturés représente une sous-estimation des valeurs expérimentales de la perméabilité relative à l'eau liquide pour les différents degrés de saturation. Plus le paramètre de Van Genuchten « q » augmente (égal à 4.5 par exemple) plus cette sous-estimation de la modélisation est observée, principalement quand le degré de saturation est élevé. Par contre, les modèles de Correy et de Fatt & Klikoff tendent à surestimer $K_{r,l}$ dans une gamme de saturation entre 0,6 et 1. Ils ne décrivent pas correctement le comportement des bétons ordinaires étudiés en fonction de la saturation. Les résultats de similitudes montrent que l'influence du diamètre de l'échantillon n'est pas significative sur la mesure de la perméabilité à l'eau liquide. L'ajustement proposé pour le modèle de DiCarlo (DiCarlo modifié (cf. **Eq. (VI-8)**)) est donc acceptable pour l'évaluation de $K_{r,l}$ en fonction de la saturation des échantillons de différentes tailles (différents diamètres).

Perspectives.

- Sur le plan expérimental, des essais menés à plus grande échelle, permettraient d'affiner les paramètres des relations perméabilité-degré de saturation obtenues. En effet, dans ce travail de recherche, le comportement étudié réside dans une gamme de tailles pour des essais de laboratoire. Alors, des travaux de recherche avec d'autres tailles d'échantillons et en appliquant d'autres modes de séchage (par exemple avec des humidités relatives contrôlées) sont nécessaires afin d'identifier l'effet de la taille sur la perméabilité du béton.
- En considérant les premières mesures de la perméabilité à l'eau dans le temps (dans ce travail expérimental après 6 heures), les perméabilités des bétons ordinaires obtenues avec des mesures à l'eau (K_l) et au gaz (K_{int}) sont proches, dont le rapport de perméabilité K_l/K_{int} est inférieur de 1. À cause de la réactivité du fluide, ce rapport augmente dans le temps. Il est donc recommandé de considérer les premières mesures (dans le temps) de K_l qui peuvent être plus proches de la vraie perméabilité du matériau. Nous pensons qu'il est peut être possible d'effectuer des essais plus rapides pour la mesure de K_l par l'application d'une pression plus élevée d'injection de l'eau.
- L'utilisation systématique de la gammadensimétrie pour avoir une mesure de la répartition de l'humidité relative interne et des gradients d'humidité entre le cœur et les faces séchées des échantillons, est recommandée pour le contrôle de l'homogénéité de la teneur en eau dans l'échantillon du cœur jusqu'aux surfaces exposées au séchage. À l'aide de la détermination des profils de teneur en eau dans l'échantillon par gammadensimétrie, la vérification de la validation des modèles prédictifs, existants pour le calcul de la perméabilité relative du béton ordinaire, pourrait être effectuée localement en fonction de la hauteur de l'échantillon testé. Cette étude peut fournir des éléments pour une modélisation des effets de la saturation du béton ordinaire sur sa perméabilité, dont d'autres paramètres inhérents à la composition du matériau et relatifs au préconditionnement des échantillons pourrait intervenir pour l'évaluation de cet indicateur important de la durabilité. En ce sens, la perméabilité du béton préconditionné par un séchage par palier peut apporter quelques éléments de réponse. Il est à noter que pour un séchage à une température modérée, il existe encore d'autres paramètres structurels à prendre en compte tels que la taille de l'échantillon testé.
- pour un séchage par palier à une température plus importante (à 105° C par exemple) l'effet de la taille sera peut être négligeable à cause de plus d'homogénéité de la teneur en eau entre des échantillons de différents diamètres séchés avec cette température. Ainsi que pour des bétons de très haute performance (BTHP) la durée des palier du séchage doit être largement étendu. Donc, elle doit être adapté à la porosité du matériau testé.
- Le modèle de Katz-Thompson II ne traduit pas la perméabilité à l'eau mesurée expérimentalement. Alors, le choix d'un modèle qui représente la bi-modalité ou la multi-modalité de la structure poreuse du matériau, ainsi que la tortuosité et la constrictivité des pores dans le béton, tels que les modèles LEPTIAB-99 [AÏT-M 99] et LEPTIAB-02 [AÏT-M 02] ou encore celui développé pour une multi-modalité des pores

par Amiri (2005) [AMIR 05], permet de réaliser une estimation et donc une vérification plus correcte des résultats expérimentaux.

- Enfin, des essais de perméabilité menés sur d'autres compositions de béton avec d'autres tailles d'échantillons testés et pour différents modes de préconditionnement, permettrait d'enrichir les résultats expérimentaux obtenus, à savoir la validation d'une relation perméabilité-degré de saturation, voir même une confirmation des relations formulées et des coefficients ajustés pour la modélisation de la perméabilité relative du béton partiellement saturé.

Références bibliographiques

- [ABBA 98] **Abbas A.** « Ecoulement gazeux dans les bétons partiellement saturés : application à la mesure de perméabilité ». *Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, France, 1998, 154 p.*
- [ABBA 99] **Abbas A., Carcasses M., Ollivier J.P.** « Gas permeability of concrete to its degree of saturation ». *Materials and Structures*, vol. 32, 1999, pp. 3-8.
- [AFPC 97] **AFPC-AFREM : groupe durabilité des bétons.** « Mode opératoire recommandé, essai de perméabilité au gaz du béton durci », *Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons, « Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité »*, Toulouse, 11-12 décembre 1997, pp. 125-134.
- [AÏTC 01] **Aitcin P.C.** « Bétons Haute Performance ». *Editions Eyrolles, 2001.*
- [AÏT-A 06] **Aït Alaiwa A., Saiyouri N.** « Caractérisation des sols injectés par mesure de perméabilité au gaz et porosité au mercure ». *24^{ème} Rencontre Universitaire de Génie Civil, 2006*, pp. 1-8.
- [AÏT-M 99] **Aït Mokhtar A., Amiri O., Sammartino S.** « Analytic modelling and experimental study of the porosity and permeability of a porous medium - application to cement mortars and granitic rock ». *Magazine of Concrete Research*, vol. 51, n°6, 1999, pp. 391-396.
- [AÏT-M 02] **Aït Mokhtar A., Amiri O., Dumargue P., Sammartino S.** « A new model to calculate water permeability of cement-based materials from MIP results ». *Advances in Cement research*, vol. 14, n°2, 2002, pp. 43-49.
- [ALAR 03] **Alarcon-Ruiz L.** « Analyse de l'évolution des propriétés microstructurales des bétons lors d'une élévation de la température ». *Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris, 2003.*
- [ALDE 99] **Aldea C.M., Shah S.P., Karr A.** « Permeability of cracked concrete ». *Materials and Structures*, vol. 32, 1999, pp. 370-376.
- [ALNA 04] **Alnajim A.** « Modélisation et simulation du comportement du béton sous hautes températures par une approche thermo-hygro-mécanique couplée. Application à des situation accidentelles ». *Thèse de Doctorat de l'UMLV, Paris, 2004.*
- [ALON 04] **Alonso C., Andrade C., Castellote M., Castro P.** « Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar ». *Cement and Concrete Research*, vol. 30, 2000, pp. 1047-1055.
- [AMIR 05] **Amiri O., Aït Mokhtar A., Sarhani M.** « Tri-dimensional modelling of cementitious materials permeability from polymodal pore size distribution obtained by mercury intrusion porosimetry tests ». *Advances in Cement research*, vol. 17, n°1, 2005, pp. 39-45.
- [AMMO 08] **Ammouche A., Baroghel-Bouny V.** « Dégradations générées par les traitements préalables aux mesures par intrusion de mercure et de perméabilité aux gaz ». *Dans "Durabilité du béton armé et de ses constituants : maîtrise et approche performantielle". Actes des journées "Durabilité 2006 : Méthodes d'essai et applications", Etudes et recherches des LCPC, série Ouvrage d'art, OA 62 (Ed. by Baroghel-Bouny V., Villain G., Thiery M. et Chaussadent T., LCPC, Paris, 2008)*, pp. 197-209.
- [ATKI 06] **Atkins P., de Paula J.** « *Atkin's physical chemistry (8th edition)* ». *Oxford University Press. 457, Oxford - United Kingdom, 1097 p.*
- [AUBE 11] **Aubernon C.** « Evolution de la perméabilité du béton sous sollicitations d'accident grave: effets du chargement mécanique, de la saturation et de la nature de fluide percolant ». *Thèse de Doctorat de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, France; 2011.*
- [BADM 81] **Badmann, R., Stockhausen, N., Setzer, M. J.** « The statistical thickness and the chemical potential of adsorbed water films ». *J. Coll. Interface Sci.*, 1981, pp. 534-542

- [BAMF 87] **Bamforth P.B.** « The relationship between permeability coefficients of concrete obtained using liquid and gases ». *Magazine of Concrete Research*, vol. 39, n°138, 1987, pp.3-11.
- [BANT 89] **Banthia N., Mindess S.** « Water permeability of cement paste ». *Cement and Concrete Research*, vol. 19, 1989, pp. 727-736.
- [BANT 05] **Banthia N., Biparva A., Mindess S.** « Permeability of concrete under stress ». *Cement and Concrete Research*, vol. 35, 2005, pp. 1651-1655.
- [BANT 07] **Banthia N., Bhargava A.** « Permeability of stressed concrete and role of fiber reinforcement ». *ACI Materials Journal*, vol. 104, n°1, 2007, 70-76.
- [BARO 94] **Baroghel-Bouny V.** « Caractérisation des pâtes de ciments et des bétons. Méthodes, Analyses, Interprétations ». *Thèse de doctorat de l'ENPC*, Paris, 1994, 468 p.
- [BARO 97] **Baroghel-Bouny V., Perrin B.C.L.** « Détermination expérimentale des propriétés hydriques de pâtes de ciment durcies : Mise en évidence des phénomènes d'hystérésis ». *Materials and Structures*, 30(200), pp. 340-348.
- [BARO 99] **Baroghel-Bouny V., Mainguy M., Lassabatère T., Coussy O.** « Characterization and identification of equilibrium and transfer moisture properties for ordinary and high-performance cementitious materials ». *Cement and Concrete Research*, vol. 29, 1999, pp. 1225-1238.
- [BARO 00] **Baroghel-Bouny V., Bastian G., Khelidj A., Godin J., Lovera P., Vandamme H.** « Diffusion et diffusivité hydriques dans les pâtes de ciment et les bétons durcis : une étude comparative des méthodes de mesure ». *Actes du séminaire Transferts 2000*, Paris, 6-7 avril 2000, LCPC, pp. 163-170.
- [BARO 01] **Baroghel-Bouny V., Mainguy M., Coussy O.** « Isothermal drying process in weakly permeable cementitious materials – Assessment of water permeability, Materials science of concrete: transport in cement based materials ». *Special volume: Proc. of Int. Conf.: On ion and mass transport in cement-based materials*, 4-5 Oct. 1999, University of Toronto, Canada, (Ed. Par: Hooton R.D., Beaudoin J.J., Thomas M.D.A., Marchand J. & Skalny J.P., *American Ceramic Society*, 2001), pp. 59-80.
- [BARO 02a] **Baroghel-Bouny V., Arnaud S., Henry D., Carcassès M., Quénard D.** « Vieillesse des bétons en milieu naturel : une expérimentation pour le XXI^{ème} siècle. III- Propriétés de durabilité des bétons mesurées sur éprouvettes conservées en laboratoire ». *Bulletin des LCPC*, n°241, Nov.-Déc. 2002, pp.13-59.
- [BARO 02b] **Baroghel-Bouny V., Gawsewitch J.** « Porosimétrie des bétons durcis par intrusion de mercure ». *Méthodes d'essai N° 58 : Caractéristiques microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons*. Document Publié par le LCPC, n° 55084, 2002.
- [BARO 04a] **Baroghel-Bouny V., Chaussadent T.** « Transfer in the concretes and durability of structures: stock of five years of research and future orientations ». *Bulletin des LCPC*, 2004, n°250, pp. 115-133.
- [BARO 04b] **Baroghel-Bouny V.** « Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages – Maîtrise de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali-réaction – État de l'art et guide pour la mise en œuvre d'une approche performantielle et prédictive sur la base d'indicateurs de durabilité ». *Documents Scientifiques et Techniques de l'Association Française de Génie Civil (AFGC)*, Bagnaux, 2004, 252 p.
- [BARO 05] **Baroghel-Bouny V.** « nouvelle approche de la durabilité du béton. Indicateurs et méthodes ». *Le béton dans la construction : définition et qualification. Base documentaire C2245*, Paris, 2005.
- [BARO 07a] **Baroghel-Bouny V.** « Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials, part I: Essential tool for analysis of hygral behaviour and its relation to pore structure ». *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, pp. 414-437.

- [BARO 07b] **Baroghel-Bouny V.** « Water vapour sorption experiments on hardened cementitious materials, part II: Essential tool for assessment of transport properties and for durability prediction ». *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, pp. 438-454.
- [BARO 07c] **Baroghel-Bouny V., Thiery M., Barberon F., Coussy O., Villain G.** « Assessment of transport properties of cementitious materials: A major challenge as regards durability? ». *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 11, n°6, Spécial issue "Propriétés de transfert des géomatériaux", (Ed. par : Lafhaj Z. & Skoczylas F. *Lavoisier*, Paris, 2007), pp. 671-696.
- [BARO 08] **Baroghel-Bouny V.** « Développement d'une approche globale, performantielle et prédictive de la durabilité des structures en béton (armé) sur la base d'indicateurs de durabilité. Bilan et perspectives ». *Etudes et recherches des LCPC, série Ouvrage d'art OA 63*, (Ed. by Baroghel-Bouny V., LCPC, Paris, Décembre 2008), 311 p.
- [BARO 82] **Baron J., Sauterey R.** « Le béton hydraulique ». *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1982.
- [BARO 92] **Baron J., Ollivier J.P.** « La durabilité des bétons ». *Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées*, Paris, 1992.
- [BAST 89] **Bastian G.** « Détermination dynamique des paramètres des transferts couplés de chaleur et d'humidité au sein d'un mortier en régime hygroscopique ». *Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, E.N.S.M, Saint-Nazaire*, 1989.
- [BAZA 72] **Bazant Z.P., Najjar L.J.** « Non linear water diffusion in non saturated concrete ». *Matériaux et Construction*, (5)25, 1972, pp. 3-20.
- [BAZA 78] **Bazant Z.P., Thonguthai W.** « Pore pressure and drying of concrete at high temperature ». *American Society of Civil Engineers*, vol. 104, n°5, 1978, pp. 1059-1079.
- [BENB 02] **Benboudjema F.** « Modélisation des déformations différées du béton sous sollicitations biaxiales : Application aux enceintes de confinement de bâtiments réacteurs de centrales nucléaires ». *Thèse de doctorat de l'Université de Marne La Vallée*, 2002, 258 p.
- [BENF 09] **Ben Fraj A.** « Transfert dans les bétons non saturés : Influence des laitiers et de l'endommagement mécanique ». *Thèse de doctorat de l'Université de Nantes*, 2009, 189 p
- [BENT 00] **Bentur A., Alexander M.G.** « A review of the work of the RILEM TC 156-ETC. Engineering of the interfacial transition zone in cementitious composites ». *Materials and Structures*, vol. 33, 2000, pp. 82-87.
- [BERT 04] **Bertolini L., Elsener B., Pedferri P., Polder R.** « Corrosion of steel in concrete - prevention, diagnosis, repairs ». *Wiley VCH*, 2004.
- [BILL 03] **Billard I.** « Contribution à l'étude des transferts de fluides au sein d'une paroi en béton : Application au cas des enceintes de confinement en conditions d'épreuve accidentelle ». *Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, France*, 2003, 183 p.
- [BIPA 05] **Biparva A.** « Permeability and durability of high volume fly-ash concrete under an applied compressive stress ». *Thèse de doctorat de l'Université de British Columbia, CANADA*, 2005.
- [BOUA 07] **Bouasker M.** « Etude numérique et expérimentale du retrait endogène au très jeune âge des pâtes de ciment avec et sans inclusions ». *Thèse de Doctorat de L'université de Nantes*, 2007, 199 p.
- [BOUK 10] **Boukli Hacene S.-M.A., Ghomari F., Schoefs F., Khelidj A.** « Etude expérimentale et statistique de l'influence de l'affaissement et l'air entraîné sur la résistance à la compression du béton ». *Lebanon Scientific Journal*, vol. 10, n°2, 2009.
- [BROO 64] **Brooks R.H., Corey A.T.** « Hydraulic properties of porous media ». *Hydrology paper n°3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado*, 1964, 27 p.
- [BRUE 09] **Brue F.** « Rôles de la température et de la composition sur le couplage thermo-hydro-mécanique des bétons ». *Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, France*, 2009, 285 p.

- [BUIL 92] **Buil M., Ollivier J.P.** « Conception des bétons : La structure poreuse, la durabilité des bétons ». *Presses de l'ENPC*, 1992, pp. 57-106.
- [CARÉ 11] **Caré S., Derkx F.** « Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars ». *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011, pp. 1248-1256.
- [CARM 51] **Carmen P.C.** « Role of capillary condensation in physical adsorption ». *Nature*, 67, 1951, pp. 112-113.
- [CARM 56] **Carman P.C.** « Flow of gases through porous media ». *Butterworth's Scientific Publications*, London, 1956, 169 p.
- [CERN 01] **Cerny R., Drchalova J.B., Rovnanikova P.** « The effects of thermal load and frost cycles on the water transport in two high-performance concretes ». *Cement and Concrete Research*, 31(8), 2001, pp. 1129-1140.
- [CHEN 09] **Chen J., Hopmans J.W., Crismer M.E.** « Parameter estimation of two-fluid capillary pressure-saturation and permeability function ». *Advances in Water Resources*, vol. 22, n°5, pp. 479-793.
- [CHEN 11] **Chen W.** « Etude expérimentale de la perméabilité du béton sous conditions thermiques et hydriques variables ». *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, France*, 2011, 171 p.
- [CHOI 06] **Choinska M.** « Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure ». *Thèse de doctorat de l'Ecole centrale de Nantes*, 2006, 184 p.
- [CHOI 07] **Choinska M., Khelidj A., Chatzigeorgiou G., Pijaudier-Cabot G.** « Effects and interactions of temperature and stress level related damage on permeability of concrete ». *Cement Concrete Research*, vol. 37, 2007, pp. 79-88.
- [COLL 11] **Collet F., Achchaq F., Djellab K., Marmoret L., Beji H.** « Water vapor properties of two hemp wools manufactured with different treatments ». *Construction and Building Materials*, 25, 2011, pp. 1079-1085.
- [CON. So. 85] **Concrete Society.** « Permeability testing of site concrete/a review of methods and experience ». *Technical report*, n°31, 1985.
- [COOK 99] **Cook R.A., Hover K.C.** « Mercury porosimetry of hardened cement pastes ». *Cement and Concrete research*, vol. 29, 1999, pp. 933-943.
- [COUS 95] **Coussy O.** « Mechanics of Porous Continua ». *John Wiley & Sons*, 1995.
- [COUS 98] **Coussy O., Eymard R., Lassabatère T.** « Constitutive unsaturated modeling of drying deformable materials ». *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 124, n° 6, 1998, pp. 658-667.
- [COUS 01] **Coussy O., Baroghel-Bouny V., Dangla P., Mainguy M.** « Evaluation de la perméabilité à l'eau liquide des bétons à partir de leur perte de masse durant le séchage ». *Revue Française de Génie Civil, Numéro Spécial « Transferts 2000 »*, vol. 5, n°1-2, 2001, pp. 269-284.
- [DAÏA 86] **Daïan J.F.** « Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux – Etude expérimentale du mortier de ciment ». *Thèse de doctorat de l'institut National Polytechnique de Grenoble, France*, 1986, 319 p.
- [DAÏA 88] **Daïan J.F.** « Condensation and isothermal water transfer in cement mortar – Part I: Pore size distribution, equilibrium water condensation and imbibitions ». *Transport in porous media*, 3, 1988, pp. 563-589.
- [DAÏA 00] **Daïan J.F.** « Evaluation des propriétés de transfert dans les matériaux cimentaires. Etude critique des modèles ». *Revue Française de Génie Civil - Transfert dans les bétons et durabilité*, vol. 5, n° 2-3, 2001, pp. 130-402.
- [DAÏA 01] **Daïan J.F.** « Évaluation des propriétés de transfert dans les matériaux cimentaires ». *Revue Française de Génie Civil. Union*, Mai 2001, pp. 179-202.

- [DALP 04] **Dal Pont S.** « Lien entre la perméabilité et l'endommagement dans les bétons à haute température » *Thèse de Doctorat de l'ENPC*, 2004, 222 p.
- [DALP 05] **Dal Pont S., Schrefler B.A., Ehrlicher A.** « Intrinsic permeability evolution in high temperature concrete: An experimental and Numerical Analysis ». *Transport in Porous Medium*, 60, 2005, pp. 43-74.
- [DANA 99] **Dana E., Skoczylas F.** « Gas relative permeability and pore structure of sandstones ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 36, 1999, pp. 613-625.
- [DARC 56] **Darcy H.** « Les fontaines publiques de la ville de Dijon » *V. Dalmont, Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines (internet)*, Paris, 1856.
- [DAVY 07] **Davy C., Skoczylas F., Barnichon J.D., Lebon P.** « Permeability of macrocracked argillite under confinement: Gas and water testing ». *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 32, n°8-14, 2007, pp. 667-680.
- [DEBY 08] **Deby F.** « Approche probabiliste de la durabilité des bétons en environnement marin ». *Thèse de l'Université de Toulouse*, 2008, 202 p.
- [DELM 04] **Delmi M.M.Y.** « Etude de l'hydratation et du couplage carbonatation-échanges hydriques dans les mortiers et bétons ». *Thèse de l'Université de la Rochelle*, 2004, 222 p.
- [DHIR 89] **Dhir R.K., Hewlett P.C., Chan Y.N.** « Near surface characteristics of concrete: Intrinsic permeability ». *Magazine of Concrete Research*, vol. 41, n°147, 1989, pp. 87-97.
- [DIAM 86] **Diamond S.** « The Microstructure of Cement Paste in Concrete ». *VIII^{ème} International Cong. Chem. Cem.*, vol. 1, Rio de Janeiro, 1986, pp 113-121.
- [DIAM 01] **Diamond S.** « Considerations in image analysis as applied to investigations of the ITZ in Concrete ». *Cement and Concrete Composites*, vol. 23, 2001, pp. 171- 178.
- [DIAM 04] **Diamond S.** « The microstructure of cement paste and concrete – a visual primer ». *Cement & concrete composites*, vol. 26, 2004, pp. 919-933.
- [DiCA 03] **DiCarlo D.A.** « Drainage in finite-sized unsaturated zones », *Advances in Water Resources*, vol. 26, 2003, pp. 1257-1266.
- [DREU 83] **Dreux G., Gorisse F.** « Composition des bétons : méthode Dreux Gorisse, bilan de cinq années d'application en Côte d'Ivoire ». *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publiques*, n° 414, Paris, Mai 1983.
- [DROU 10] **Drouet E.** « Impact de la température sur la carbonatation des matériaux cimentaires - Prise en compte des transferts hydriques ». *Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan*, Paris, 2010, 304p.
- [DUVA 92] **Duval R., Harnain H.** « La durabilité du béton vis-à-vis des eaux agressives ». *Presse de LNPC. La durabilité des bétons* (Im. Baron J., Olivier J.P. Paris, 1992), pp. 351-392.
- [EL-DI 94] **El-Dieb A.S., Hooton R.D.** « Evaluation of the Katz-Thompson model for estimating the water permeability of cement-based materials from mercury intrusion porosimetry data ». *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, 1994, pp. 443-455.
- [EL-DI 95] **El-Dieb A.S., Hooton R.D.** « Water permeability measurement of high performance concrete using high-pressure triaxial cell ». *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n°6, 1995, pp. 1199-1208.
- [EN 12390-8] **Norm Européenne** « essai pour béton durci – Partie 8: Profondeur de pénétration d'eau sous pression ». AFNOR; Indice de classement : P 18-436, Octobre 2001.
- [EN 206-1] **Norme Européenne** « Béton. Partie1 : Spécification, performances, production et conformité », 2004.
- [FATT 59] **Fatt I., Klikoff W.A.** « Effect of fractional wettability on multiphase flow through porous media ». *AIME Technical Note, AIME Trans.*, n°2043, 1959, pp. 216-246.

- [FELD 68] **Feldman R.F., Sereda P.J.** « A model for hydrated Portland cement paste as deduced from sorption-length change and mechanical properties ». *Colloque RILEM*, Munich, 1-3 Avril, 1968.
- [FELD 86] **Feldman R.F.** « Pore structure, Permeability and diffusivity as related to Durability ». *The 8th International congress on the Chemistry of Cement*, Rio de Janeiro, Brazil, September 22-27, (édité par l'Institut de Recherche en construction, Canada), 1986, pp. 1-21.
- [FERA 00] **Feraille F., Ehrlacher A.** « Description de la microstructure du béton à l'aide de la saturation en liquide ». *Revue Française de Génie Civil*, vol. 4, n° 7-8, 2000, pp 851-874.
- [GALL 00] **Gallé C., Daian J.F.** « Gas permeability of unsaturated cement based materials: application of a multi-scale network model ». *Magazine of Concrete Research*, 52, pp. 251-263.
- [GALL 01] **Gallé C.** « Effect of drying on cement-based materials pore structure as identified by mercury intrusion porosimetry: a comparative study between oven-vacuum and freeze-drying ». *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2001, pp. 1464-1477.
- [GAO 13] **Gao Z., Hu Q.** « Estimating permeability using median pore-throat radius obtained from mercury intrusion porosimetry ». *Journal Geophysics Engineering*, vol. 10, n° 025014, 2013, 7pp.
- [GARB 90] **Garboczi E.J.** « Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: a critical review ». *Cement and concrete research*, vol. 20, 1990, pp. 591-601.
- [GONI 09] **Gonilho Pereira C., Castro Gomes J., Pereira De Oliveira L.** « Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete ». *Construction and Building Materials*, vol. 23, n°2, 2009, pp. 602-608.
- [GOUA 06] **Goual M.S., Bali A., De Barquin F., Dheilly R.M., Quéneudec M.** « Isothermal moisture properties of clayed cellular concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder ». *Cement and Concrete Research*, 36, 2006, pp. 1768-1776.
- [GRAS 00] **Grasberger S., Meschke G.** « A hygro-thermal-poroplastic damage model for durability analyses of concrete structures ». *Proceedings ECCOMAS 2000*, Barcelona, 11-14 September 2000.
- [GREG 82] **Gregg S.J., Sing K.S.W.** « Adsorption, surface area and porosity ». *2nd edition*, Academic Press, London, United Kingdom, 1982.
- [GRUS 01] **Gruszkiewicz M.S., Horita J., Simonson J.M., Mesmer R.E., Hulen J.B.** « Water adsorption at high temperature on core samples from the geysers geothermal field ». *Geothermics*, n°30, California, USA, 2001, pp. 269-302.
- [GUÉN 97] **Guénot-Delahaie I.** « Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton ». *Thèse de doctorat de l'ENPC*, avril 1997.
- [HAGE 04] **Hager I.** « Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques ». *Thèse de doctorat de l'ENPC*, Paris, 2004, 183p.
- [HAGY 69] **Hagymassy J., Brunauer S., Mikhail R.S.** « Pore structure analysis by water vapor adsorption - curves for water vapor ». *J. Coll. Interface Sci.*, 1969, pp. 485-491.
- [HAMA 09] **Hamami A. E. A.** « Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires ». *Thèse de doctorat de l'Univ de La Rochelle*, 2009, 180p.
- [HANC 68] **Hancox N.L.** « The role of moisture diffusion in the drying of cement paste under the influence of temperature gradients ». *British Journal of Applied physics*. 1(2), 1968, pp. 1767-1770.
- [HANN 11] **Hannich R.** « Contribution à l'étude des bétons portés en température / Evolution des propriétés de transfert / Etude de l'éclatement ». *Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon*, France, 2011, 308 p.

- [HANS 86] **Hansen T.C.** « Physical structure of hardened cement paste, a classical approach ». *Materials and Structures*, 19 (114), 1986, pp. 423-436.
- [HAPP 86] **Happel J., Brenner H.** « Low Reynolds number hydrodynamics ». *Dordrecht: Martinus Nijhoff*, 1986.
- [HARM 65] **Harmathy Z.T.** « effect of moisture on the fire endurance of building materials. *ASTM Special Technical Publication*, n°385, 1965, pp. 74-95.
- [HEAR 91] **Hearn N., Mills R.H.** « A simple permeameter for water or gas flow ». *Cement and Concrete Research*, vol. 21, n° 2/3, 1991, pp. 257-261.
- [HEAR 94] **Hearn N., Detwiler R.j., Sframeli C.** « Water permeability and microstructure of three old concretes ». *Cement and Concrete Research*, vol. 24 (4), 1994, pp. 633-640.
- [HEAR 97] **Hearn N., Lok G.** « Measurement of permeability under uniaxial compression – a test method ». *ACI Materials Journal*, vol. 95, n°6, 1997, 691–694.
- [HEAR 98] **Hearn N.** « Self-sealing, autogeneous healing and continued hydration: What is the difference? ». *Materials and Structures*, vol. 95 (6), 1998, pp. 563-567.
- [HEAR 99] **Hearn N.** « Effect of shrinkage and load-induced cracking on water permeability of concrete ». *ACI Materials Journal*, vol. 96, 1999, pp. 234-241.
- [HERV 10] **Hervé E., Caré S., Seguin J.S.** « Influence of the porosity gradient in cement paste matrix on the mechanical behaviour of mortar ». *Cement and Concrete Research*, vol. 40, 2010, pp.1060-1071.
- [HILL 71] **Hillel D.** « Soil and Water – Physical Principles and Processes ». *Academic Press*, New-York, 1971.
- [HOOT 89] **Hooton R.D.** « What is needed in a permeability test for evaluation of concrete quality ». *Proceedings. Pore Structure and Permeability of Cementitious Materials*, Boston, MA, USA, "Materials Research Society", 1989, vol. 137, pp. 141-150.
- [HOSE 09] **Hoseini M., Bindiganavile V., Banthia N.** « The effect of mechanical stress on permeability of concrete: a review ». *Cement and Concrete Research*, vol. 31, 2009, pp. 213–220.
- [HUGH 66] **Hughes B.P., Lowe I.R.G., Walker J.** « The diffusion water in concrete at temperature between 50 and 95 °C ». *British Journal of Applied physics*. 17(12), pp. 1545-1552.
- [ISHI 07] **Ishida T., Maekawa K., Kishi T.** « Enhanced modelling of moisture equilibrium and transport in cementitious materials under arbitrary temperature and relative humidity history ». *Cement and Concrete Research*. 37(4), 2007, pp. 565-578.
- [JACO 98] **Jacobs F.** « Permeability to gas of partially saturated concrete ». *Magazine of Concrete Research*, vol. 50, n°2, 1998, pp. 115-121.
- [JASO 04] **Jason L.** « Relation endommagement perméabilité pour les bétons. Application aux calculs de structures ». *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes*, France; 2004, 211 p.
- [KAME 14] **Kameche Z.A., Ghomari F., Choinska M., Khelidj A.** « Assessment of liquid water and gas permeabilities of partially saturated ordinary concrete ». *Construction and Building Materials*, vol. 65, 2014, pp. 551–565.
- [KATZ 86] **Katz A.J., Thompson A.H.** « Quantitative prediction of permeability in porous rock ». *Physical Review*, vol. 34, n° 11, 1986, pp. 8179-8181.
- [KATZ 87] **Katz A.J., Thompson A.H.** « Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements ». *Journal of Geophysic Research*, vol. 92, 1987, pp. 599-607.
- [KERM 91] **Kermani A.** « Permeability of stressed concrete ». *Building Research Information*, Vol. 19, n°6, 1991, pp. 360–366.
- [KLIN 41] **Klinkenberg L.J.** « The permeability of porous media to liquid and gas ». *American Petroleum Institute, Drilling and Production Practice*, 1941, pp. 200-213

- [KOLL 89] **Kollek J.J.** « The determination of permeability of concrete to oxygen by the method CEMBUREAU – a recommendation ». *Materials and Structures*, vol. 22, 1989, pp. 225-230.
- [LAFH 06] **Lafhaj Z., Goueygou M., Djerbi A., Kaczmarek M.** « Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content ». *Cement and Concrete Research*, vol. 36, 2006, pp. 625-633.
- [LAGH 06] **Laghcha A.** « Contribution à l'étude des transferts gazeux et liquide sous sollicitation thermo-hydrrique au sein des parois en béton endommagées ». *Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon*, 2006, 220 p.
- [LARB 93] **Larbi J.A.** « Microstructure of the interfacial zone around aggregate particles in concrete ». *Heron*, vol. 38(1), 1993, pp. 1-69.
- [LION 04] **Lion M.** « Influence de la température sur le comportement poromécanique et hydraulique d'une roche carbonatée et d'un mortier. Études expérimentales ». *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille*, 2004.
- [LIU 11] **Liu J.** « Etude expérimentale de la perméabilité relative des matériaux cimentaires et simulation numérique du transfert d'eau dans le béton ». *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille, France*, 158 p.
- [LOOS 02] **Loosveldt H., Lafhaj Z., Skoczylas F.** « Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar ». *Cement and Concrete Research*, vol. 32, n°9, 2002, pp. 1357-1363.
- [LUCK 89] **Luckner L., Van Genuchten M.T., Nielsen D.R.** « A consistent set of parametric models for the tow-phase-flow of immiscible fluids in the subsurface ». *Water Resource Research*, vol. 25, n°10, 1989, pp. 2187-2193.
- [LYDO 95] **Lydon F.D.** « Effect of coarse aggregate and water/cement ratio on intrinsic permeability of concrete subject to drying ». *Cement and Concrete Research*, vol. 25, n°8, 1995, pp. 1737-1746.
- [MAIN 99] **Mainguy M.** « Modèles de diffusion non linéaires en milieux poreux. Application à la dissolution et au séchage des matériaux cimentaires ». *Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris*, 1999, 255p.
- [MAIN 01a] **Mainguy M., Ulm F.J., Heukamp F.H.** « Similarity properties of demineralization and degradation of cracked porous materials ». *International Journal of Solids and Structures*, 38, 2001, pp. 7079-7100.
- [MAIN 01b] **Mainguy M., Coussy O., Baroghel-Bouny V.** « Role of air pressure in drying of weakly permeable materials ». *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 127, n°6, pp. 1225-1238, 2001.
- [MALI 92] **Malier Y.** « Les bétons à hautes performances – Caractérisation, Durabilité, Applications ». *Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1992, 674 p.
- [MARÉ 92] **Maréchal J.C., Beaudoux M.** « Transfert diphasique expérimental sur une paroi épaisse de béton soumise à une élévation rapide de pression et de température ». *Annales de l'ITBTP*, n° 506, 1992, pp. 73-112.
- [MART 95] **Martys N.S.** « Survey of concrete transport properties and their measurement ». Report NISTIR 5592, NIST, 1995.
- [MASO 80] **Maso J.C.** « La liaison entre les granulats et la pâte de ciment hydraté ». *7ème Congrès International de Chimie des Ciments, Rapport principal*, Paris, 1980.
- [MASO 82] **Maso J.-C.** « La liaison pâte-granulats, le béton hydraulique » Presses de l'ENPC, chapitre 14, 1982, pp. 247-259.
- [MASS 98] **Masse P., François R., Gagné R.** « Outils expérimentaux pour l'étude de l'influence de la fissuration sur les propriétés de transfert des bétons ». *1ère Rencontres internationales « Sciences des matériaux et propriétés des bétons »*. Toulouse, France; 1998.

- [MAYE 92] **Mayer G., Jacobs F., Wittmann F.H.** « Experimental determination and numerical simulation of the permeability of cementitious materials ». *Nuclear Engineering and Design*, 1992, vol. 138, pp. 171-177.
- [MEHT 86] **Mehta P.K.** « Concrete. Structure, properties and materials ». *Englewood Cliff, New Jersey, Prentice-Hall Inc.*, 1986, 438 p.
- [MEHT 93] **Mehta P.K., Monteiro P. J. M.** « Concrete : Structure, Properties and Materials ». *Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*, 1993.
- [MEHT 06] **Mehta P.K., Monteiro P.J.M.** « Concrete-Microstructure, properties, and materials ». (*3rd edition*), *McGraw-Hill, United States*, 2006.
- [MENO 04] **Menou A.** « Etude du comportement thermomécanique des bétons à haute température : Approche multi échelle de l'endommagement thermique ». *Thèse de doctorat de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, France*, 2004, 160 p.
- [MIND 09] **Mindeguia J. C.** « Contribution expérimentale à la compréhension des risques d'instabilité thermique des bétons ». *Thèse de doctorat à l'université de Pau et des pays de l'Adour, France*, 2009, 234 p.
- [MONL 04] **Monlouis-Bonnaire J.P., Verdier J., Perrin B.** « Prediction of the relative permeability to gas flow of cement-based materials ». *Cement and Concrete Research*, vol. 34, 2004, pp. 737-744.
- [MORA 92] **Moranville-Regourd M.** « Microstructures des bétons à hautes performances : du matériau à l'ouvrage », *Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, 1992.
- [MOYN 87] **Moyne C.** « Transferts couplés chaleur-masse lors du séchage : prise en compte du mouvement de la phase gazeuse ». *Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine*, 1987.
- [MUAL 76] **Mualem Y.** « A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media ». *Water Resources Research*, vol. 12, 1976, pp. 513-522.
- [NEVI 00] **Neville A.M.** « Propriétés des bétons ». *Editions Eyrolles*, 2000.
- [N.A. 92] **Norme Algérienne NA 231**, édition et diffusion *Abou Hamou Moussa*, Alger, 1992.
- [NGUY 07] **Nguyen T.Q.** « Modélisations physico-chimiques de la pénétration des ions chlorures dans les matériaux cimentaires ». *Thèse de doctorat de l'ENPC, Paris*, 2007, 233 p.
- [PARK 87] **Parker J.C., Lenhard R.J., Kuppusamy T.** « A parametric model for constitutive properties governing multiphase flow in porous media ». *Water Resource Research*, vol. 23, n°4, 1987, pp. 618-624.
- [PARR 94] **Parrott L.J.** « Moisture conditioning and transport properties of concrete test specimens ». *Materials and Structures*, vol. 27, 1994, pp. 460-468.
- [PERL 06] **Perlot C., Verdier J., Carcassès M.** « Influence of cement type on transport properties and chemical degradation: Application to nuclear waste storage ». *Materials and Structures*, vol. 39, 2006, pp. 511-523.
- [PERR 92a] **Perraton D.** « La perméabilité aux gaz des bétons hydrauliques ». *Thèse de doctorat de l'INSA de Toulouse, France*, 1992, 225 p.
- [PERR 92b] **Perraton D, Aïtcin P-C, Carles-Gibergues A.** « Permeability, as seen by the researcher ». (Dans: *High performance concrete – From material to structure*. Ed. Malier Y., Spon EFN., Cambridge, UK: Chapman & Hall, 1992, pp. 252-275.
- [PERR 99] **Perraton D., Aïtcin P.C., Carles-Gibergues A.** « Mesure de la perméabilité au gaz du béton : perméabilité apparente et perméabilité intrinsèque – Partie I : Validation des concepts de Carman et de Klinkenberg dans le cas d'un BHP ». *Bulletin des LCPC*, n°221, Mai-Juin 1999, pp. 69-78.

- [PERR 01] **Perraton D., Aïtcin P.-C.** « Perméabilité du béton de peau : le choix du granulats peut-il s'avérer un élément plus déterminant que le rapport E/C ? ». *Bulletin des LCPC*, n°232, Mai-Juin 2001, pp. 59-72.
- [PERR 98] **Perrin B., Baroghel-Bouny V., Chemloul L.** « Méthodes de détermination de la diffusivité hydrique de pâtes de ciment durcies ». *Matériaux et Constructions*, 31, 1998, pp. 235-241.
- [PHIL 57] **Philip J.R., De Vries D.A.** « Moisture movement in porous materials under temperature gradients ». *Physics Education*, vol. 38, 2, 1957, pp. 222-232.
- [PIAS 94] **Piasta J.** « Heat deformation of cement phases and microstructure of cement paste ». *Materials and structures: research and testing. RILEM*, vol. 17, n°102, 1994, Paris, pp. 415-420.
- [PICA 01a] **Picandet V.** « Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et la diffusivité hydrique des bétons ». *Thèse de doctorat de l'université de Nantes*, 2001, 229 p.
- [PICA 01b] **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. 1525-1532.
- [PIHL 82] **Pihlajaraava S.E.** « Estimation of drying of concrete at different relative humidities and temperature.... ». *Creep and Shrinkage in Concrete Structures, edition John Wiley & sons Ltd*, New York, édité par Bazant et Wittmann, 1982.
- [POWE 47] **Powers T.C., Brownyard T.L.** « Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste ». *Research Laboratory of Portland Cement Association, Bull. n° 22*, reprinted from *J. Am. Concr. Inst. (Proc.)*, vol. 43, 1947, pp. 101-132.
- [POWE 53] **Powers T.C., Helmuth R.A.** « Theory of volume changes in hardened portland-cement pasteduring freezing ». *Highway Research Board*, vol. 32, 1953, pp. 285-297.
- [POWE 59] **Powers T.C., Copeland L.E., Mann M.** « Capillary continuity or discontinuity in cement pastes ». *J. Portland Cem. Assoc. Res. Dev. Lab.* 1959(May), pp. 38-48.
- [POYE 09] **Poyet S.** « Experimental investigation of the effect of temperature on the first desorption isotherm of concrete ». *Cement and Concrete Research*. vol. 39, 2009, pp. 1052-1059.
- [QUÉN 91] **Quénard D., Sallée, H.** « Le transfert isotherme de la vapeur d'eau condensable dans les matériaux microporeux du bâtiment ». *Cahier de CSTB*, n° 2525, 1991.
- [QUÉN 97] **Quénard D., Carcassès M.** « les résultats des essais croisés AFREM : Perméabilité ». *Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons, « méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité »*, Toulouse, 11-12 décembre 1997, pp. 41-58.
- [REGO 82] **Regourd M.** « L'hydratation du ciment Portland ». *Presse de l'ENPC*, Paris, 1982.
- [ROZI 07] **Rozière E.** « Etude de la durabilité des bétons par une approche performan-tielle ». *Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Nantes, France*, 2007, 250 p.
- [SAMA 92] **Samaha H.R., Hover K.C.** « Influence of microcracking on the mass transport properties of concrete ». *ACI Materials Journal*, vol. 89, 1992, pp. 416-424.
- [SALI 87] **Salih S.A.** « Permeability and pore structure of cementitious composites ». *Thèse de Doctorat de l'Université de Sheffield*, 1987.
- [SAVA 97] **Savage B.M., Janssen D.J.** « Soil physics principles validated for use in predicting unsaturated moisture movement in Portland cement concrete ». *ACI Materials Journal*, vol. 94, n°1, 1997, pp. 63-70.
- [SCHE 07] **Scherer G.W., Valenza J.J., Simmons G.** « New methods to measure liquid permeability in porous materials ». *Cement and Concrete Research*, vol. 37, 2007, pp. 386-397.
- [SCRI 01] **Scrivener K.** « Microstructural characterisation methods for cementitious materials ». *Cours on-line, EPFL*, 2011

[SCRI 04] **Scrivener K., Crumbie A.K., Laugesen P.** « The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete ». *Interface Science*, vol. 12, 2004, pp. 411-421.

[SENG 02] **Seng C. K., Zhang M. H.** « Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete ». *Cement and Concrete Research*, vol. 32, 2002, pp. 639-645.

[SHEN 03] **Sheng D., Sloan S.W., Gens A., Smith D.W.** « Finite element formulation and algorithms for unsaturated soils. Part I: Theory ». *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 27, 2003, pp. 745-765.

[SIER 74] **Sierra R.** « Contribution a l'étude de l'hydratation des silicates calciques hydrauliques ». *Rapport de recherche n°39, Laboratoire des Ponts et Chaussées, France*, 1974.

[SIER 82] **Sierra R.** « Répartition des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C₃S et de ciment portland ». *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, n° 117, 1982, pp. 77-81.

[SUGI 96] **Sugiyama T., Bremner T.W., Holm T.A.** « Effect of stress on gas permeability in concrete ». *ACI Materials Journal*, vol. 93, n°5, 1996, pp. 443-450.

[SUN 09] **Sun Z., Xu Q.** « Microscopic, physical and mechanical analysis of polypropylene fiber reinforced concrete ». *Materials Science and Engineering A*, 2009.

[TANI 09] **Tanikawa W., Shimamoto T.** « Comparison of Klinkenberg-corrected gas permeability and water permeability in sedimentary rocks ». *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 46, 2009, pp. 229-238.

[TCHE 88] **Tchemiakine A.** « Projet / Agrégats Tlemcen-2, Gisement Djebel Abiod ». *Rapport géologique final, Boumerdes, Juin 1988*.

[THÉN 66] **Thénoz B.** « Contribution à l'étude de la perméabilité des roches et de leur altérabilité – Application à des roches granitiques ». *Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, France*, 1966, 101 p.

[THIE 07] **Thierry M., Baroghel-Bouny V., Bourneton N., Villain G., Stefani C.** « Modelling the drying of concrete – analysis of different modes of water transfer ». *European Journal of Civil Engineering*, vol. 11, n°5, 2007, pp. 541-577.

[THOM 87] **Thompson A.H., Katz A.J., Krohn C.E.** « The microgeometry and transport properties of sedimentary rocks ». *Adv. Phys.*, vol. 36, n°5, 1987.

[TRAN 09] **Tran T.T.** « Contribution à l'étude du comportement mécanique et hydromécanique du béton ». *Thèse de doctorat de l'Université de Liège, Belgique*, 2004, 229 p.

[TRAN 10] **Tranle, A. D.** « Etudes des transferts hygrothermiques dans le béton de chanvre et leur application au bâtiment ». *Thèse de doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne*.

[TSIV 03] **Tsivilis S., Tsantilas J., Kakali G., Chaniotakis E., Sakellariou A.** « The permeability of portland limestone cement concrete ». *Cement and Concrete Research*, vol. 33, 2003, pp. 1465-1471.

[TSIM 98] **Tsimbrovska M.** « Dégradation des bétons à hautes performances soumis à des températures élevées. Evolution de la perméabilité en liaison avec la microstructure ». *Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble 1, France*, 1998.

[TSUK 90] **Tsukamoto M.** « Tightness of fiber concrete, *Darmstadt Concrete* ». *Annual Journal of Concrete and Concrete Structure*, 1990, pp. 215-225.

[TUMI 98] **Tumidajski P.J., Lin B.** « On the validity of the Katz-Thompson equation for permeabilities in concrete ». *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n°5, 1998, 643-647.

[TUUT 82] **Tuuti K.** « Corrosion of steel in concrete ». *Swedish Cement and Concrete Research Institute (CBI), Report 4.82, Stockholm, Sweden*, 1982.

- [UDELL 85] **Udell K.S.** « Heat transfer in porous media considering phase change and capillarity – the heat pipe effect ». *International Journal of Heat Mass Transfer*, vol. 28, n°2, 1985, pp. 485-495.
- [VALE 70] **Valenta O.** « The permeability and durability of concrete in aggressive conditions ». Dans: *Proceedings of the 10th International Congress on Large Dams*. Montreal, 1970, pp. 103-117.
- [VAN-G 80] **Van Genuchten M.T.** « A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils ». *Soil Science Society of America Journal*, vol. 44, 1980, pp. 892-898.
- [VERB 69] **Verbeck G.J., Helmuth R.A.** « Structure and physical properties of cement paste ». *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo*, vol. 3, 1969, pp. 1-32.
- [VERD 01] **Verdier J.** « Contribution à la caractérisation de l'évolution du taux de fuite des enceintes de confinement du parc nucléaire ». *Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier*, Toulouse, 2001, 296 p.
- [VICH 08] **Vichot A. Olivier J.P.** « La durabilité des bétons ». *Presse de l'ENPC*, 2008, pp. 870.
- [VILL 01] Villain G., Baroghel Bouny V., Kounkou C., Hua C. « Mesure de la perméabilité aux gaz en fonction du taux de saturation des bétons ». *Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, n°2, 2001, pp. 251-269.
- [WANG 12] **Wang X.** « Modélisation du transport multi-espèces dans les matériaux cimentaires saturés ou non saturés et éventuellement carbonatés ». *Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est*, 2012, 210 p.
- [WASH 21] **Washburn E.W.** « Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous materials ». *Proc. National Academic Sciences*, vol. 7, 1921, pp. 115-116.
- [WEBB 01] **Webb P.A.** « An introduction to the physical characterization of materials by mercury intrusion porosimetry with emphasis on reduction and presentation of experimental data ». *Micromeritics Instrument Corporation*, 2001, pp. 1-23.
- [WONG 01] **Wong S.F., Wee T.H., Shwaddiwudhipong S., Lee S.L.** « Study of water movement in concrete ». *Magazine of concrete research*, 53(3), 2001, pp. 205-220.
- [XI 94] **Xi Y., Bazant Z.P., Molina L., Jennings H.M.** « Moisture diffusion in cementitious materials : moisture capacity and diffusivity ». *Advanced Cement Based Materials*, 1994, pp. 258-266.
- [XU 97] **Xu K., Daïan J.F., Quenard D.** « Multiscale structures to describe porous media I et II ». *Transport in porous media*, 26, 1997.
- [YURT 03] **Yurtdas I.** « Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire : étude expérimentale sur mortiers ». *Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lille*, France, 2003.
- [YSSO 97] **Yssorche M.P., Olivier J.P.** « Importance de l'état hydrique du matériau sur la mesure de la perméabilité au gaz ». *Compte-rendu des journées techniques AFPC-AFREM, Durabilité des bétons, « méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité »*, Toulouse, 11-12 décembre 1997, pp. 25-39.

Liste des figures

Introduction générale.

Fig. i-1.	<i>Exemples de dégradations d'ouvrages dues à la corrosion des aciers du béton armé. (a) Pont en bord de mer, (b) Bâtiment en zone urbaine [http://www.gramme.be/unite9/pmwikiOLD/pmwiki.php?n=BETON0607.CauseDeDeterioration]</i>	15
Fig. i-2.	<i>Corrosion des armatures du béton armé. Schématisation de l'évolution des dégradations du béton et de l'acier [BARO 08].....</i>	16
Fig. i-3.	<i>Corrosion initiée par la carbonatation [http://www.bertolit.ch].....</i>	17

Chapitre I.

Fig. I-1.	<i>Description du milieu poreux avec les trois phases [NGUY 07].....</i>	26
Fig. I-2.	<i>Modèle des particules de C-S-H de Feldman et Sereda [FELD 68], revu par Sierra [SIER 82] (cité par Baroghel-Bouny [BARO 94] et Yurtdas [YURT 03]).....</i>	28
Fig. I-3.	<i>Les différentes formes de pores dans la pâte de ciment durcie classées par taille d'après Mehta et Monteiro [MEHT 93].....</i>	31
Fig. I-4.	<i>Représentation schématique de la connectivité d'un réseau poreux.....</i>	31
Fig. I-5.	<i>Schéma d'un cheminement tortueux dans une structure poreuse.....</i>	32
Fig. I-6.	<i>Schéma d'un capillaire.....</i>	33
Fig. I-7.	<i>État de l'eau dans le gel de C-S-H selon Sierra [SIER 74] cité par Regourd [REGO 82].....</i>	35
Fig. I-8.	<i>Illustration de la répartition de l'eau adsorbée à la surface des C-S-H, dont A et B sont deux exemples possibles [BARO 94].....</i>	35
Fig. I-9.	<i>Description idéalisée de l'eau dans les zones d'adsorption empêchée et de la transition avec les pores capillaires [BAZA 72].....</i>	36
Fig. I-10.	<i>Différentes formes d'eau dans le matériau cimentaire [DELM 04].....</i>	37
Fig. I-11.	<i>Représentation schématique des mécanismes de transport de l'eau au sein de la pâte de ciment [BENB 02].....</i>	37
Fig. I-12.	<i>Cinétique de désaturation d'un béton à base du ciment CEM V en fonction de la température [BRUE 09].....</i>	38
Fig. I-13.	<i>Schématization du processus d'adsorption lorsque l'humidité relative ambiante augmente [COLL 11].....</i>	39
Fig. I-14.	<i>Schématization du processus de désorption lorsque l'humidité relative ambiante diminue [BARO 94].....</i>	40
Fig. I-15.	<i>La diffusion de Knudsen (a) et la diffusion surfacique (b) [XI 94].....</i>	41
Fig. I-16.	<i>Isotherme de sorption d'un béton ordinaire [GREG 82].....</i>	42
Fig. I-17.	<i>Isothermes de première désorption pour différents bétons [VERD 01] (Pihlajavaara pour un béton de E/C=0.5 ; Baroghel Bouny pour un béton ordinaire de E/C=0.48 et Verdier pour un béton de E/C=0.48).....</i>	43
Fig. I-18.	<i>Courbe de pression capillaire déduite de l'isotherme de sorption [BARO 94], [BARO 99].....</i>	44

Chapitre II.

Fig. II-1.	<i>(a) écoulement laminaire, (b) : écoulement turbulent.....</i>	50
Fig. II-2.	<i>Influence de la viscosité sur la vitesse du fluide.....</i>	51
Fig. II-3.	<i>Profil des vitesses d'un fluide visqueux dans un tube capillaire.....</i>	52
Fig. II-4.	<i>Profil des vitesses d'un gaz dans un capillaire sous l'effet d'un gradient de pression.....</i>	54
Fig. II-5.	<i>Grandeurs associées à l'infiltration d'un gaz à travers un disque de béton lors d'un essai de perméabilité.....</i>	57
Fig. II-6.	<i>Méthode de Klinkenberg et son interprétation sur une série de résultats obtenus avec un béton ordinaire.....</i>	60
Fig. II-7.	<i>Influence de la température de séchage (80 et 105° C) sur la perméabilité apparente en fonction de $1/P_m$ pour deux bétons BHP (notés C2 et D2) [HANN 11].....</i>	64
Fig. II-8.	<i>Profils de taux de saturation en eau liquide mesurés par gammadensimétrie aux différentes étapes du protocole de préconditionnement AFPC-AFREM [AFPC 97] pour un béton ordinaire M25 et un béton à hautes performances BH [BARO 02a].....</i>	66
Fig. II-9.	<i>Microstructure de la zone de transition interfaciale [SUN 09].....</i>	67
Fig. II-10.	<i>Effet de la taille des agrégats sur le débit [TSUK 90].....</i>	68
Fig. II-11.	<i>Influence du rapport E/C sur la perméabilité mesurée à l'eau [FELD 86].....</i>	68
Fig. II-12.	<i>Influence du degré de saturation sur la perméabilité au gaz du béton pour des différents rapports E/C [GALL 00].....</i>	69
Fig. II-13.	<i>Influence du degré de saturation sur la perméabilité au gaz des pâtes de ciment pour des différents rapports E/C [GALL 00].....</i>	69
Fig. II-14.	<i>Distribution de la taille des pores de pâtes de ciment à divers E/C [VERB 69].....</i>	70
Fig. II-15.	<i>Influence de la nature du ciment sur la porosité [PERL 06] (mortier 1: à base de ciment CEM I ; mortier 2: à base de ciment CEM V/A).....</i>	71
Fig. II-16.	<i>Perméabilités effectives au gaz en fonction de la saturation pour des bétons à base de ciments CEM I et CEM V [CHEN 11].....</i>	71
Fig. II-17.	<i>Représentation de la connectivité d'un réseau poreux [VERD 01].....</i>	72
Fig. II-18.	<i>Variation de la perméabilité du béton en fonction de la saturation [ABBA 99].....</i>	73
Fig. II-19.	<i>Evolution de la perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation en eau liquide pour deux bétons BO et BHP. [VILL 01].....</i>	74
Fig. II-20.	<i>Exemples de relations empiriques traduisant les perméabilités relatives d'un milieu poreux [BILL 03].....</i>	74
Fig. II-21.	<i>Relation pression capillaire-saturation pour les bétons BO et BHP [MAIN 99].....</i>	76
Fig. II-22.	<i>Perméabilité relative pour un béton ordinaire (E/C = 0.49) [MAIN 99].....</i>	78
Fig. II-23.	<i>Évolution de la perméabilité relative au gaz en fonction de la saturation en eau. Relation de Van Genuchten ($q = 0.5$) [VAN-G 80] et Monlouis-Bonnaire ($q = 5.5$) [MONL 04].....</i>	78
Fig. II-24.	<i>Évolution de la perméabilité relative à l'eau liquide et aux gaz pour les bétons M25, BO et BHP, d'après [BARO 07b].....</i>	79

Chapitre III.

Fig. III-1.	<i>Rectification des surfaces planes du disque en béton.....</i>	87
--------------------	--	----

Liste des figures

Fig. III-2.	<i>Mesure de la hauteur de l'échantillon à l'aide d'un pied à coulisse.....</i>	87
Fig. III-3.	<i>Echantillons du béton de différentes tailles (5, 11 et 15 cm de diamètre).....</i>	88
Fig. III-4.	<i>Résistance à la compression à 28 jours des bétons B30, B32, B35 et B40.....</i>	88
Fig. III-5.	<i>Protocole de saturation - (a) : procédure AFPC-AFREM (1997) [AFPC 97] (b) : procédure AFPC-AFREM modifiée [BENF 09].....</i>	89
Fig. III-6.	<i>Dispositif de saturation.....</i>	89
Fig. III-7.	<i>Vue générale de perméamètre CEMBUREAU (IUT St-Nazaire).....</i>	91
Fig. III-8.	<i>Débitmètre massique du gaz (Capacité : 2 L/minute).....</i>	91
Fig. III-9.	<i>Schéma de Principe du perméamètre CEMBUREAU utilisé au laboratoire GeM, France.....</i>	92
Fig. III-10.	<i>Emplacement d'un échantillon du béton dans la cellule de perméabilité.....</i>	93
Fig. III-11.	<i>Essai de pénétration de l'eau dans le béton (Laboratoire EOLE).....</i>	95
Fig. III-12.	<i>Fendage d'une éprouvette du béton (Laboratoire EOLE).....</i>	95
Fig. III-13.	<i>Perméamètre à l'eau (Laboratoire EOLE).....</i>	95
Fig. III-14.	<i>Schéma de Principe de perméamètre à l'eau utilisé au laboratoire EOLE.....</i>	96
Fig. III-15.	<i>Profondeur de pénétration de l'eau à travers un échantillon (15 x 5) cm du béton B35.....</i>	97
Fig. III-16.	<i>MEB du B35 après un séchage à 60° C (x 311).....</i>	100

Chapitre IV.

Fig. IV-1.	<i>Perméabilité au gaz des bétons testés à l'état sec en fonction de l'inverse de la pression moyenne appliquée.....</i>	104
Fig. IV-2.	<i>Perméabilité au gaz du béton B30 à différents degrés de saturation.....</i>	105
Fig. IV-3.	<i>Perméabilité au gaz du béton B32 à différents degrés de saturation.....</i>	105
Fig. IV-4.	<i>Perméabilité au gaz du béton B35 à différents degrés de saturation.....</i>	105
Fig. IV-5.	<i>Perméabilité au gaz du béton B40 à différents degrés de saturation.....</i>	105
Fig. IV-6.	<i>Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B30.....</i>	107
Fig. IV-7.	<i>Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B32.....</i>	107
Fig. IV-8.	<i>Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B35.....</i>	108
Fig. IV-9.	<i>Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B40.....</i>	108
Fig. IV-10.	<i>Évolution de la contribution de l'écoulement moléculaire du gaz à travers le béton B35 en fonction de son degré de saturation.....</i>	109
Fig. IV-11.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B30.....</i>	110
Fig. IV-12.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B32.....</i>	110
Fig. IV-13.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B35.....</i>	111
Fig. IV-14.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B40.....</i>	111
Fig. IV-15.	<i>Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B30.....</i>	112

Liste des figures

Fig. IV-16.	<i>Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B32.....</i>	112
Fig. IV-17.	<i>Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B35.....</i>	112
Fig. IV-18.	<i>Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B40.....</i>	112
Fig. IV-19.	<i>Perméabilité apparente au gaz en fonction de $1/P_m$ pour le béton B35 séché à 60 et à 80° C.....</i>	113
Fig. IV-20.	<i>Relation entre le carré du gradient de pression et le débit de gaz lors des essais de perméabilité sur le B35.....</i>	114
Fig. IV-21.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B35 séché à 60° C et à 80° C.....</i>	115
Fig. IV-22.	<i>Perméabilité relative au gaz en fonction de degré de saturation pour le béton B35 séché à 60° et à 80° C.....</i>	116
Fig. IV-23.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation des bétons : B30, B35 et B40.....</i>	117
Fig. IV-24.	<i>Volume cumulé d'intrusion du mercure dans les bétons B30, B35 et B40.....</i>	118
Fig. IV-25.	<i>Distribution de la taille des pores pour les bétons B30, B35 et B40 et la détermination des diamètres critiques d_{c1} et d_{c2} pour une distribution bimodale (cas de béton B40).....</i>	119
Fig. IV-26.	<i>Perméabilité relative au gaz des bétons B30, B35 et B40 en fonction de la saturation.....</i>	120
Fig. IV-27.	<i>Évolution de la constante de Klinkenberg β en fonction de degré de saturation.....</i>	121
Fig. IV-28.	<i>Évolution de la contribution de l'écoulement moléculaire du gaz à travers le béton en fonction de son degré de saturation.....</i>	122
Fig. IV-29.	<i>Évolution de la perméabilité intrinsèque des bétons B32 et B35 en fonction de leurs degrés de saturation.....</i>	123
Fig. IV-30.	<i>Distribution de la taille des pores pour les bétons B32, B35.....</i>	124
Fig. IV-31.	<i>Évolution de la perméabilité relative au gaz des bétons B32 et B35 en fonction de leurs degrés de saturation.....</i>	124
Fig. IV-32.	<i>Perméabilité intrinsèque du béton B35 en fonction du degré de saturation pour différentes tailles d'échantillons.....</i>	125
Fig. IV-33.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction de l'inverse du rayon de l'échantillon.....</i>	126
Fig. IV-34.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du diamètre de l'échantillon testé.....</i>	126
Fig. IV-35.	<i>Évolution de la constante de Klinkenberg β en fonction du degré de saturation pour différentes tailles d'échantillons.....</i>	127
Fig. IV-36.	<i>Perméabilité relative au gaz du béton B35 en fonction du degré de saturation pour différentes tailles d'échantillons.....</i>	128
Fig. IV-37.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B30.....</i>	129
Fig. IV-38.	<i>Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B30.....</i>	129
Fig. IV-39.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B32.....</i>	129
Fig. IV-40.	<i>Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B32.....</i>	129
Fig. IV-41.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction du degré de saturation pour le béton B40.....</i>	130

Liste des figures

Fig. IV-42.	<i>Perméabilité relative au gaz en fonction du degré de saturation pour le béton B40.....</i>	130
Fig. IV-43.	<i>Évolution de la perte en masse en fonction de K_{rg} du béton B30.....</i>	131
Fig. IV-44.	<i>Évolution de la perte en masse en fonction de K_{rg} du béton B32.....</i>	131
Fig. IV-45.	<i>Évolution de la perte en masse en fonction de K_{rg} du béton B35.....</i>	131
Fig. IV-46.	<i>Évolution de la perte en masse en fonction de K_{rg} du béton B40.....</i>	131

Chapitre V.

Fig. V-1.	<i>Débit d'eau en fonction du taux de saturation du béton B30.....</i>	136
Fig. V-2.	<i>Débit d'eau en fonction du taux de saturation du béton B32.....</i>	136
Fig. V-3.	<i>Débit d'eau en fonction du taux de saturation du béton B35.....</i>	136
Fig. V-4.	<i>Débit d'eau en fonction du taux de saturation du béton B40.....</i>	136
Fig. V-5.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B30 à l'état saturé.....</i>	138
Fig. V-6.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B32 à l'état saturé.....</i>	138
Fig. V-7.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B35 à l'état saturé.....</i>	138
Fig. V-8.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B40 à l'état saturé.....</i>	138
Fig. V-9.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B30 en fonction de son degré de saturation.....</i>	139
Fig. V-10.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B32 en fonction de son degré de saturation.....</i>	139
Fig. V-11.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B35 en fonction de son degré de saturation.....</i>	139
Fig. V-12.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B40 en fonction de son degré de saturation.....</i>	139
Fig. V-13.	<i>Perméabilité relative à l'eau liquide du béton B30.....</i>	141
Fig. V-14.	<i>Perméabilité relative à l'eau liquide du béton B32.....</i>	141
Fig. V-15.	<i>Perméabilité relative à l'eau liquide du béton B35.....</i>	141
Fig. V-16.	<i>Perméabilité relative à l'eau liquide du béton B40.....</i>	141
Fig. V-17.	<i>Évolution de la perméabilité à l'eau en fonction de S_l pour les bétons B30, B35 et B40.....</i>	142
Fig. V-18.	<i>Perméabilité relative à l'eau liquide en fonction de S_l pour les bétons B30, B35 et B40.....</i>	143
Fig. V-19.	<i>Évolution de la perméabilité à l'eau en fonction de S_l pour les bétons B32 et B35.....</i>	143
Fig. V-20.	<i>Perméabilité relative à l'eau en fonction de S_l pour les bétons B32 et B35.....</i>	144
Fig. V-21.	<i>Perméabilité à l'eau des échantillons de différentes tailles en fonction de S_l.....</i>	145
Fig. V-22.	<i>Perméabilité relative à l'eau des échantillons de différentes tailles en fonction de S_l.....</i>	146
Fig. V-23.	<i>Essai de perméabilité sur deux échantillons de différents diamètres.....</i>	147
Fig. V-24.	<i>Mesure de la profondeur de pénétration de l'eau dans le béton.....</i>	147
Fig. V-25.	<i>Détermination de d_c du béton B35 à partir de la distribution des volumes poreux obtenue par PIM.....</i>	149
Fig. V-26.	<i>Détermination de d_{max} (pour $d < d_c$) du béton B30 à partir de la distribution des volumes poreux, obtenue par PIM.....</i>	150
Fig. V-27.	<i>Détermination de d_{max} (pour $d < d_c$) du béton B32 à partir de la distribution des volumes poreux, obtenue par PIM.....</i>	150

Liste des figures

Fig. V-28.	<i>Détermination de d_{max} (pour $d < d_c$) du béton B35 à partir de la distribution des volumes poreux, obtenue par PIM.....</i>	150
Fig. V-29.	<i>Détermination de d_{max} (pour $d < d_c$) du béton B40 à partir de la distribution des volumes poreux, obtenue par PIM.....</i>	150
Fig. V-30.	<i>Perméabilité au gaz mesurée et calculée pour les quatre bétons étudiés.....</i>	151
Fig. V-31.	<i>Perméabilité à l'eau mesurée et calculée pour les quatre bétons étudiés.....</i>	152
Fig. V-32.	<i>Comparaison entre les différentes perméabilités déterminées pour les quatre bétons étudiés.....</i>	152

Chapitre VI.

Fig. VI-1.	<i>Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,g}$ en fonction de S_l pour le béton B30.....</i>	158
Fig. VI-2.	<i>Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,g}$ en fonction de S_l pour le béton B32.....</i>	158
Fig. VI-3.	<i>Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,g}$ en fonction de S_l pour le béton B35.....</i>	159
Fig. VI-4.	<i>Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,g}$ en fonction de S_l pour le béton B40.....</i>	159
Fig. VI-5.	<i>Validité du modèle de Van Genuchten-Mualem pour l'évaluation de $K_{r,g}$ en fonction de S_l pour le béton B35 séché à 60° et à 80° C.....</i>	160
Fig. VI-6.	<i>Perméabilité relative au gaz des bétons B30, B35 et B40 en fonction de la saturation. (Validation du modèle de Van Genuchten-Mualem ajusté avec un paramètre $q = 3.5$).....</i>	161
Fig. VI-7.	<i>Perméabilité relative au gaz des bétons B32 et B35 en fonction de la saturation. (Validation du modèle de Van Genuchten-Mualem ajusté avec un paramètre $q = 3.5$).....</i>	162
Fig. VI-8.	<i>Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,g}$ du béton B35 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.....</i>	163
Fig. VI-9.	<i>Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,g}$ du béton B30 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.....</i>	164
Fig. VI-10.	<i>Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,g}$ du béton B32 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.....</i>	164
Fig. VI-11.	<i>Validation de la modélisation pour l'évaluation de $K_{r,g}$ du béton B40 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.....</i>	165
Fig. VI-12.	<i>Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,l}$ en fonction de S_l pour le béton B30.....</i>	167
Fig. VI-13.	<i>Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,l}$ en fonction de S_l pour le béton B32.....</i>	167
Fig. VI-14.	<i>Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,l}$ en fonction de S_l pour le béton B35.....</i>	168
Fig. VI-15.	<i>Validation de la modélisation pour le calcul de $K_{r,l}$ en fonction de S_l pour le béton B40.....</i>	168
Fig. VI-16.	<i>Perméabilité relative à l'eau liquide en fonction de S_l pour les bétons B30, B35 et B40.....</i>	169

Liste des figures

Fig. VI-17.	<i>Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rl} en fonction de S_l des bétons B32 et B35 à base des ciments de différentes classes de résistance mécanique.....</i>	170
Fig. VI-18.	<i>Validation de la modélisation pour l'évaluation de K_{rl} du béton B35 en fonction de la saturation pour des échantillons de différentes tailles.....</i>	170
Fig. VI-19.	<i>Évolution des perméabilités relatives au gaz et à l'eau liquide des bétons B30, B32, B35 et B40 en fonction de leurs degrés de saturation.....</i>	172

Annexes

Fig. A-1.	<i>Mise en œuvre de l'approche performantielle développée sur la base d'indicateurs de durabilité : Processus n° 1 : évaluation de la durabilité "potentielle" d'un béton armé donné, Processus n° 2 : sélection ou qualification de formules de béton pour un ouvrage donné.....</i>	204
Fig. B-1.	<i>Evolution de K_{app} en fonction de l'inverse de la pression moyenne pour un échantillon du béton B30 Détermination de K_{int} selon l'approche de Klinkenberg....</i>	207
Fig. B-2.	<i>Evolution de débit indiquée en Volte par les débitmètres massiques de capacités (2L/min et 150 mL/min) en fonction du temps pour un échantillon du béton B30 à une pression de 3 bars.....</i>	207
Fig. E-1.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation des trois échantillons du béton B30.....</i>	211
Fig. E-2.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation des trois échantillons du béton B32.....</i>	211
Fig. E-3.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation des trois échantillons du béton B35.....</i>	211
Fig. E-4.	<i>Perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation des trois échantillons du béton B40.....</i>	211
Fig. F-1.	<i>Dispositif de mesure de la porosité par intrusion de mercure (IUT de St-Nazaire)...</i>	214

Liste des tableaux

Introduction générale.

Tab. i-1.	<i>Extrait du tableau 1 de la norme européenne EN 206-1. Définition des classes d'exposition.....</i>	18
Tab. i-2.	<i>Extrait du Tableau F.1 et de l'annexe F de la norme EN 206-1. Valeurs limites spécifiées applicables à la composition et aux propriétés du béton.....</i>	19

Chapitre II.

Tab. II-1.	<i>Paramètres a et b à température ambiante [MAIN 99].....</i>	76
Tab. II-2.	<i>Définition du paramètre m dans la littérature pour différents bétons ; ordinaire (BO) et à haute Performance (BHP), 1 : Baroghel-Bouny et coll. (1999), 2 : Mainguy et coll. (2001), 3 : Monlouis-Bonnaire et coll. (2004), 4 : Dal Pont et coll. (2004).....</i>	79
Tab. II-3.	<i>Tableau récapitulatif des échantillons testés avec différentes tailles [KAME 14].....</i>	80

Chapitre III.

Tab. III-1.	<i>Compositions chimiques et minéralogiques des deux ciments testés.....</i>	84
Tab. III-2.	<i>Caractéristiques physiques des ciments Portlands CEM II/A 42,5 et CEM II/A 32,5.....</i>	84
Tab. III-3.	<i>Propriétés physiques des granulats.....</i>	85
Tab. III-4.	<i>Composition des bétons étudiés.....</i>	85
Tab. III-5.	<i>Caractéristiques physiques des bétons à l'état frais.....</i>	86
Tab. III-6.	<i>Caractéristiques des bétons à l'état durci.....</i>	90
Tab. III-7.	<i>Nombre d'éprouvettes utilisés dans l'élaboration du programme expérimental.....</i>	101

Chapitre IV.

Tab. IV-1.	<i>Résultats de perméabilité aux gaz des quatre bétons étudiés pour différents degrés de saturation.....</i>	106
Tab. IV-2.	<i>Caractéristiques microstructurales (Φ_{Hg} : Porosité au mercure total (%), d_{c1} et d_{c2} : Diamètres critiques (nm)).....</i>	119

Chapitre V.

Tab. V-1.	<i>Gain en poids des échantillons de béton soumis à l'essai de perméabilité sous l'eau.....</i>	137
Tab. V-2.	<i>Perméabilité à l'eau du béton B35 mesurée par la méthode de Valenta.....</i>	147
Tab. V-3.	<i>Paramètres de calcul de perméabilité des différents BO étudiés.....</i>	151

Annexes.

Tab. A-1.	<i>Durabilité "potentielle" vis-à-vis de la corrosion des armatures : classes (indicatives) et valeurs limites associées aux indicateurs de durabilité généraux d'après [BARO 04b] et [BARO 05c].....</i>	204
------------------	---	-----

Liste des tableaux

Tab. B-1.	<i>Exemple de calcul de K_{int} à partir de différentes K_{app} mesurées à différentes pressions d'injection.....</i>	206
Tab. E-1.	<i>Résultats de K_{int} des trois échantillons testés du béton B30 pour différents degré de saturation.....</i>	212
Tab. E-2.	<i>Résultats de K_{int} des trois échantillons testés du béton B32 pour différents degré de saturation.....</i>	212
Tab. E-3.	<i>Résultats de K_{int} des trois échantillons testés du béton B35 pour différents degré de saturation.....</i>	213
Tab. E-4.	<i>Résultats de K_{int} des trois échantillons testés du béton B40 pour différents degré de saturation.....</i>	213

ANNEXES

Annexe A.

Indicateurs de durabilité

La durabilité du matériau béton dans son environnement est présentée comme une préoccupation majeure de la norme et une des raisons de son évolution. En janvier 2005, la norme NF EN 206-1, intitulée «*Béton, Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité*», est entrée en vigueur. Lors de l'élaboration de cette norme européenne, une attention particulière a été apportée à une approche performantielle pour les spécifications concernant la durabilité.

L'approche performantielle est une démarche globale qui permet de prendre en compte tous les aspects technico-économiques spécifiques à chaque ouvrage, comme l'importance de l'ouvrage, l'environnement, les sollicitations physico-chimiques et mécaniques, les risques induits, la durée de vie demandée, etc.

Des méthodes de conception performantielle des bétons pour leurs durabilités ont déjà été proposées. Alors, de nouveaux concepts et outils sont développés, comme l'utilisation d'indicateurs de durabilité proposés dans le guide AFGC [\[BARO 04b\]](#), [\[BARO 05\]](#).

Les indicateurs de durabilité sont des paramètres qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis d'un processus de dégradation considéré. C'est un outil de l'approche performantielle.

Les indicateurs de durabilité généraux, cités ci-après sont des paramètres de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. Ils sont indispensables pour la prévention de la corrosion des armatures que de l'alcali-réaction ou de toutes autres dégradations d'origine physico-chimique. Le nombre de ces paramètres est très petit et ils sont complémentaires et ne sont pas systématiquement nécessaires pour chaque cas pratique. Ces indicateurs sont les suivants :

- Perméabilité à l'eau liquide ;
- Perméabilité aux gaz ;
- Porosité accessible à l'eau ;
- Coefficient de diffusion (apparent ou effectif) des ions chlorures ;
- Teneur en portlandite (Ca(OH)₂).

Les indicateurs généraux peuvent être substitués par des paramètres qui sont plus faciles à déterminer, plus spécifiques aux problèmes posés ou plus adaptés aux modèles mis en œuvre. La notion d'indicateurs de substitution a été aussi introduite dans le guide AFGC [\[BARO 05\]](#). Ces indicateurs peuvent être la porosité accessible au mercure, la résistivité électrique, le coefficient d'absorption capillaire,...etc.

Dans les modèles prédictifs existants, on utilise, comme données d'entrée, d'autres paramètres complémentaires aux indicateurs précédemment définis, tels que la chaleur

d'hydratation, le degré de saturation du ciment, concentration en chlorures à la surface exposé, la teneur en C-S-H, caractéristiques de réseau de fissures initial,...etc.

Afin d'assurer une durabilité minimum, la nouvelle norme européenne NF EN 206-1 établit des prescriptions réglementaires de formulation des bétons en fonction de l'agressivité des conditions environnementales définies sous forme de classe d'exposition.

Des valeurs limites pour les indicateurs de durabilité ont été proposées en fonction de la classe d'exposition et de la durée de vie exigée dont un exemple de ces valeurs est présenté sur le **Tab. A-1**. La procédure pour mettre en œuvre l'approche performantielle est illustrée sur la **Fig. A-1**.

Tab. A-1. Durabilité "potentielle" vis-à-vis de la corrosion des armatures : classes (indicatives) et valeurs limites associées aux indicateurs de durabilité généraux d'après [BARO 04b] et [BARO 05c].

Indicateurs de durabilité généraux	Classes et valeurs limites				
	Durabilité potentielle				
	Très faible (TF)	Faible (F)	Moyenne (M)	Élevée (E)	Très élevée (TE)
Porosité accessible à l'eau P_{eau} (en %)	> 16	14 à 16	12 à 14	9 à 12	6 à 9
Coefficient de diffusion effectif des chlorures D_{eff} (en $10^{-12} m^2 \cdot s^{-1}$)	> 8	2 à 8	1 à 2	0,1 à 1	< 0,1
Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de migration) $D_{app(mig)}$ (en $10^{-12} m^2 \cdot s^{-1}$)	> 50	10 à 50	5 à 10	1 à 5	< 1
Coefficient de diffusion apparent des chlorures (mesuré par essai de diffusion) $D_{app(dif)}$ (en $10^{-12} m^2 \cdot s^{-1}$)				< 5	
Perméabilité apparente aux gaz (2) $K_{app(gaz)}$ (en $10^{-10} m^2$)	> 1 000	300 à 1 000	100 à 300	30 à 100	< 30
Perméabilité à l'eau liquide (à P_{max} , par mesure directe du flux, après saturation) k_{liq} (en $10^{-18} m^2$)	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
Teneur en $Ca(OH)_2$ (3) (% massique par rapport au ciment)	< 10	10 à 13	13 à 20	20 à 25	≥ 25

(1) Les valeurs indiquées correspondent à des mesures réalisées selon les méthodes décrites dans l'article [C 2 245] sur des éprouvettes conservées préalablement dans l'eau. Ces valeurs sont valables pour des bétons âgés de 3 mois au plus.
(2) Mesurée avec un perméamètre à charge constante à $P_{entrée} = 0,2$ MPa et après étuvage à $T = 105^\circ C$ (taux de saturation $s = 0$).
(3) Pour des formules simples (par exemple sans addition pouzzolanique).

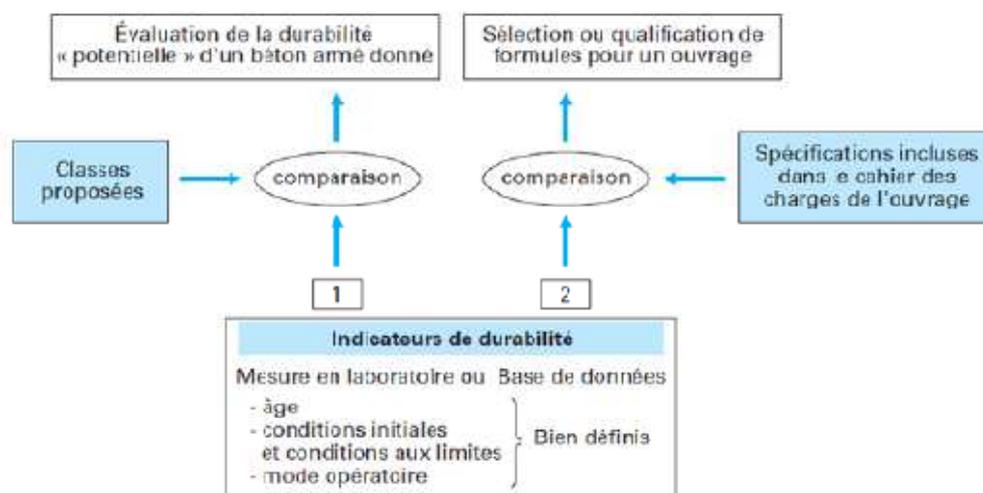


Fig. A-1. Mise en œuvre de l'approche performantielle développée sur la base d'indicateurs de durabilité :
Processus n° 1 : évaluation de la durabilité "potentielle" d'un béton armé donné,
Processus n° 2 : sélection ou qualification de formules de béton pour un ouvrage donné.

Pour évaluer de façon qualitative ou quantitative la durabilité "potentielle" d'un béton armé donné, il s'agira de comparer les valeurs des indicateurs de durabilité qui auront été qualifiés pour ce béton, avec les classes proposées dans le **Tab. A-1**, tel qu'illustré en **Fig. A-1** (processus n° 1). La quantification des indicateurs s'effectuera, soit expérimentalement sur des éprouvettes fabriquées en laboratoire et dans des conditions requises par les protocoles d'essai, soit en se reportant à une base de données dans le cas où la formule a déjà fait l'objet d'étude. Une telle évaluation peut être effectuée selon chaque indicateur déterminé ou sur la base d'une appréciation globale.

Cette évaluation de la durabilité "potentielle" d'un béton armé donné peut permettre au concepteur ou au maître d'œuvre d'évaluer une durabilité a priori ne dépendant que du matériau constitutif de l'ouvrage (béton). Cette méthodologie constitue une première utilisation très simple des indicateurs de durabilité. Grâce à des modèles cohérents avec l'approche performantielle en utilisant des indicateurs de durabilité comme les données d'entrée, la prédiction de la durée de vie d'un ouvrage devient possible.

Annexe B.

Exemple de calcul de K_{int} à partir de différentes K_{app} mesurées à différentes pressions d'injection.

Selon l'approche de Klinkenberg, la perméabilité intrinsèque K_{int} est la valeur obtenue par l'intersection entre l'axe des ordonnées et la régression linéaire des différentes valeurs de K_{app} mesurées à différentes pressions d'injection, c.-à-d. la valeur de K_{int} est une valeur de perméabilité au gaz quand la pression d'injection du gaz tend vers l'infinie (cf. Fig. B-1), autrement dit, quand le gaz tend vers une phase condensée. La perméabilité intrinsèque est donc indépendante de la pression appliquée.

Ci-dessous, un exemple de calcul de perméabilités apparentes mesurées à cinq pressions moyennes différentes pour un échantillon du béton B30 est présenté. Nous rappelons que des débitmètres massiques de différentes capacités (150 mL/min et 2L/min) ont été installés sur le dispositif CEMBUREAU pour la mesure précise de débit du gaz pendant l'essai de perméabilité. L'exemple présenté correspond aux débits mesurés à l'aide de débitmètre de grande capacité (2L/min).

Il est important de noter, qu'à la fin de chaque essai de perméabilité au gaz, la pression d'injection du gaz nitrogène (P (bar)) est enregistrée, et pour plus de précision, la valeur de débit du gaz, indiquée sur le Tab. B-1 pour chaque pression, correspondent à la moyenne arithmétique des valeurs de débit enregistrées par le débitmètre massique pendant les trois dernières minutes de l'essai CEMBUREAU après que la stabilisation de flux du gaz à travers l'échantillon du béton est assurée. Un exemple de la stabilisation de débit peut être observé sur la Fig. B-2 pour un échantillon du béton B35 sous une pression de 3 bars.

Tab. B-1. Exemple de calcul de K_{int} à partir de différentes K_{app} mesurées à différentes pressions d'injection.

Essai de perméabilité							
Test avec le débitmètre mass IEG	5V	2L/min	3,33E-05	m ³ /s			
Ech1 (15x5)	P (bar)	Débit (V)	T (°C)	D (mm)			
(01/07/2013)	2,974	0,301	20	150			
KAM - B30	2,505	0,237	P_{atm} (Pa)	H (m)			
	2,02	0,178	103100	0,0498			
	1,499	0,122		S (m ²)			
	1,003	0,076		0,0177			
	Q (m³/s)	μ (Pa.s)	T_a	P (Pa)	K_{app} (m²)	1/P_m	
	2,00E-06	1,74E-05	293	2,97E+05	1,40E-16	3,97141E-06	
	1,58E-06		P₀	2,51E+05	1,44E-16	4,37924E-06	
	1,19E-06		101325	2,02E+05	1,51E-16	4,89956E-06	
	8,13E-07		T₀	1,50E+05	1,59E-16	5,6164E-06	K_{int} (m²)
	5,07E-07		273	1,00E+05	1,72E-16	6,52529E-06	8,9E-17

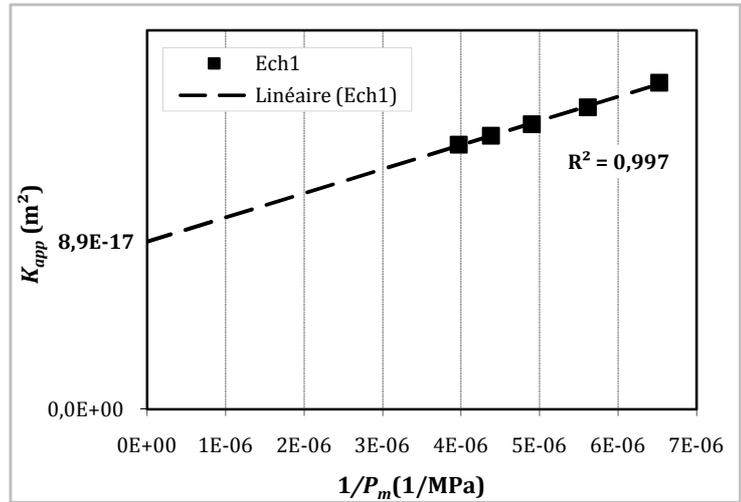


Fig. B-1. Evolution de K_{app} en fonction de l'inverse de la pression moyenne pour un échantillon du béton B30
Détermination de K_{int} selon l'approche de Klinkenberg.

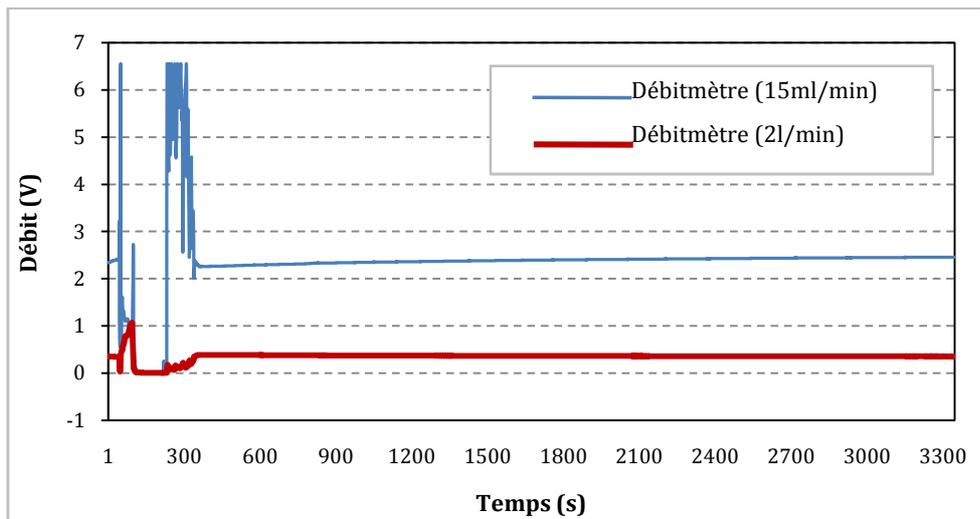


Fig. B-2. Evolution du débit indiqué en Volts par les débitmètres massiques de capacités (2l/min et 150 ml/min) en fonction du temps pour un échantillon du béton B30 à une pression de 3 bars.

Annexe C.

Fiche technique de l'Adjuvant utilisé dans la formulation du béton B40.

Construction	Notice produit Edition 04/2010 Numéro 1.60 Version n°2010.075 SIKA VISCOCRETE® 3045	
	SIKA VISCOCRETE® 3045 Plastifiant/Réducteur d'eau de nouvelle génération pour bétons prêts à l'emploi.	
	Conforme à la Norme NF EN 934-2 Tab. 1 et 2 	
	Présentation	SIKA VISCOCRETE 3045 est un plastifiant réducteur d'eau non chloré et prêt à l'emploi, à base de polycarboxylates modifiés, qui se présente sous la forme d'un liquide marron.
	Domaines d'application	SIKA VISCOCRETE 3045 permet d'obtenir un long maintien de rhéologie (>1H30). Il est donc parfaitement adapté à l'industrie du BPE et à l'utilisation sur chantier. SIKA VISCOCRETE 3045 permet la fabrication de : <ul style="list-style-type: none">■ bétons plastiques à fluides,■ bétons à faibles rapports E/C avec ou sans fumée de silice,■ bétons pompés sur longues distances. Dans les bétons fluides, SIKA VISCOCRETE 3045 améliore la stabilité, limite les risques de ségrégation et rend la formule moins sensible aux variations d'eau et des constituants.
	Caractères généraux	SIKA VISCOCRETE 3045 est un plastifiant réducteur d'eau qui confère au béton les propriétés suivantes : <ul style="list-style-type: none">■ haute réduction d'eau,■ maintien prolongé de la rhéologie,■ robustesse vis-à-vis de la ségrégation,■ bel aspect de parement au décoffrage. 
	Caractéristiques	
	Aspect	Liquide brun
	Conditionnement	<ul style="list-style-type: none">■ Fût de 230 kg■ Conteneur perdu de 1000 litres■ Vrac
	Stockage	Dans un local fermé, à l'abri de l'ensoleillement direct et du gel, entre 5 et 30 °C. Le produit peut geler, mais, une fois dégelé lentement et réhomogénéisé, il retrouve ses qualités d'origine. En cas de gel prolongé et intense, vérifier qu'il n'a pas été déstabilisé.
Conservation	6 mois dans son emballage d'origine intact	
Données techniques		
densité	1,11 ± 0,02	
		

pH	5 ± 1
Teneur en ions Cl ⁻	≤ 0,1 %
Teneur en Na ₂ O Eq.	≤ 2,5 %
Extrait sec	36,4 ± 1,8 %
Conditions d'application	
Dosage	Plage d'utilisation recommandée : 0,25 à 2,5 % du poids de liant selon les performances recherchées. Dosage usuel du SIKA VISCOCRETE 3045 : 0,3 % à 0,8 %.
Mise en œuvre	SIKA VISCOCRETE 3045 est ajouté, soit, en même temps que l'eau de gâchage, soit en différé dans le béton préalablement mouillé avec une fraction de l'eau de gâchage.
Précautions d'emploi	En cas de contact avec la peau, laver abondamment à l'eau. Consulter la fiche de données de sécurité sur Internet www.sika.fr

Mentions légales

Produit réservé à un usage strictement professionnel
Nos produits bénéficient d'une assurance de responsabilité civile.

«Les informations sur la présente notice, et en particulier les recommandations relatives à l'application et à l'utilisation finale des produits SIKA, sont fournies en toute bonne foi et se fondent sur la connaissance et l'expérience que la Société SIKA a acquises à ce jour de ses produits lorsqu'ils ont été convenablement stockés, manipulés et appliqués dans des conditions normales. En pratique, les différences entre matériaux, substrats et conditions spécifiques sur site sont telles que ces informations ou toute recommandation écrite ou conseil donné n'impliquent aucune garantie de qualité marchande autre que la garantie légale contre les vices cachés. Nos agences sont à votre disposition pour toute précision complémentaire. Notre responsabilité ne saurait d'aucune manière être engagée dans l'hypothèse d'une application non conforme à nos renseignements. Les droits de propriété détenus par des tiers doivent impérativement être respectés. Toutes les commandes sont acceptées sous réserve de nos Conditions de Vente et de Livraison en vigueur. Les utilisateurs doivent impérativement consulter la version la plus récente de la fiche technique correspondant au produit concerné, qui leur sera remise sur demande.»



Sika Franco S.A.
84, rue Edouard Vaillant – BP 104
93351 Le Bourget Cedex
France

Tel. : 01 49 92 80 00
Fax : 01 49 92 80 21
www.sika.fr

Organisme de certification :
AFNOR CERTIFICATION
11, avenue Francis de Pressensé
93571 Saint-Denis La Plaine cedex
France

Annexe D.

Exemple du calcul de K_l

Selon la loi de Darcy ;

$$Q_l = K_l \cdot A \cdot i$$

Alors ;

$$K_l = \frac{Q_l}{A \cdot i} = \frac{Q_l}{A \cdot \left(\frac{\Delta H}{\Delta h}\right)}$$

Où Δh est l'épaisseur de l'échantillon du béton et ΔH est la charge hydraulique calculée par la différence entre la pression à l'intérieur et la pression à l'extérieur de l'échantillon du béton. La pression à l'extérieur est équivalente à la pression atmosphérique. Elle est prise dans l'exemple ci-dessous égale à 101,3 KPa, elle peut être exprimée comme un équivalent d'une colonne d'eau de hauteur de 10,34 m.

Alors :

$$K_l = \frac{Q_l}{A \cdot \frac{(\text{pression à l'intérieur} - \text{pression à l'extérieur})}{\text{épaisseur du béton}}}$$

Pression à l'extérieur = pression atmosphérique

$$\text{Pression à l'intérieur} = \left[\frac{(0,3 \text{MPa} \cdot 1000 \text{KPa})}{101,3 \text{KPa}} \right] \cdot 10,34 = 30,62 \text{ m}$$

Donc :

$$K_l = \frac{Q}{A \cdot \frac{(30,62 - 10,24)}{0,05}} = \frac{0,05 \cdot Q}{A \cdot 20,38}$$

$$A = 0,00785 \text{ m}^2 = 78,5 \text{ cm}^2$$

Alors :

$$K_l = \frac{5 \cdot Q \text{ [ml/s]}}{78,5 \cdot 2038}$$

$$K_l = \frac{5 \cdot Q}{159983} \text{ [cm/s]}$$

$$1 \text{ m/s} = 10^{-7} \text{ m}^2,$$

$$\text{Donc : } 1 \text{ cm/s} = 10^{-2} \text{ m/s} = 10^{-9} \text{ m}^2$$

Exemple :

$$Q_l = 1 \text{ ml/h} = 2,77\text{E} - 4 \text{ ml/s}$$

Alors :

$$K_l = \frac{5 \cdot Q}{159983} = \frac{5 \cdot (2,77\text{E} - 4)}{159983} = 8,67\text{E} - 9 \text{ cm/s}$$

$$K_l = 8,67\text{E} - 9 \text{ cm/s} = 8,67\text{E} - 11 \text{ m/s} = 8,67\text{E} - 18 \text{ m}^2$$

Annexe E.

Récapitulatif des résultats de K_{int} mesurée à différents degrés de saturation sur trois échantillons pour chaque béton étudié.

Les Figs. E-1, E-2, E-3 et E-4, présente l'évolution de la perméabilité intrinsèque au gaz des trois échantillons testés pour les bétons B30, B32, B35 et B40 en fonction de leurs degrés de saturation. Un récapitulatif des valeurs de K_{int} de tous les échantillons testés est présenté dans les Tabs. E-1, E-2, E-3 et E-4 pour tous les bétons.

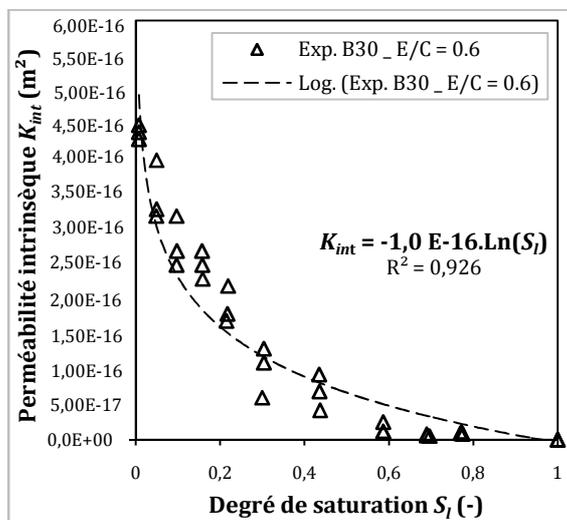


Fig. E-1. Perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation des trois échantillons du béton B30.

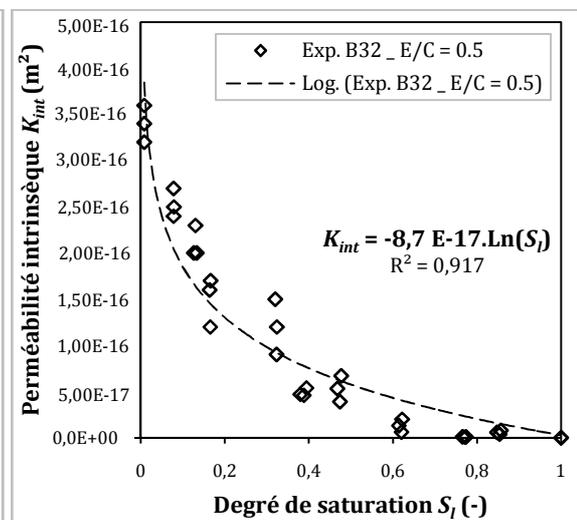


Fig. E-2. Perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation des trois échantillons du béton B32.

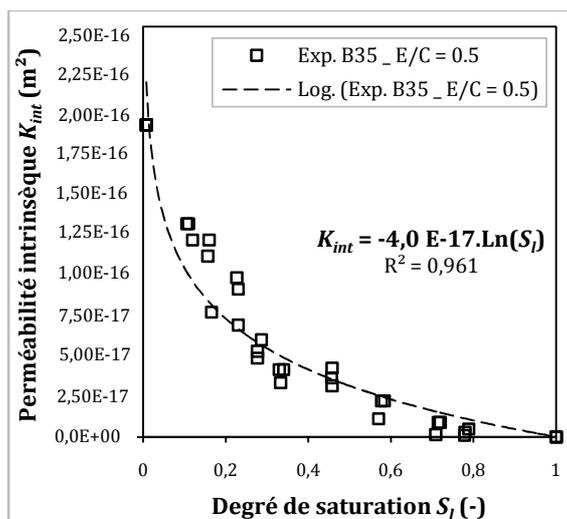


Fig. E-3. Perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation des trois échantillons du béton B35.

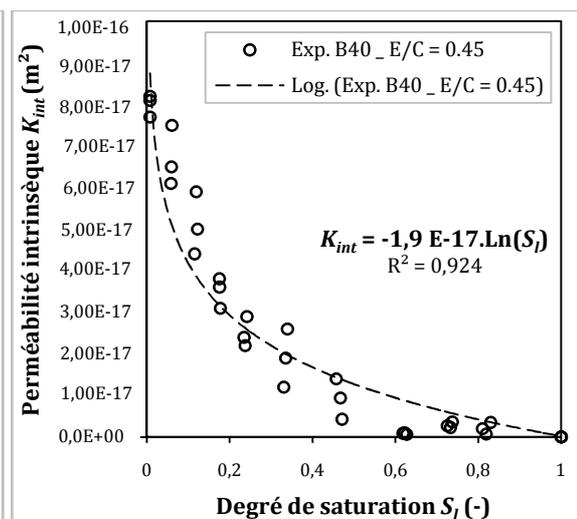


Fig. E-4. Perméabilité intrinsèque en fonction de la saturation des trois échantillons du béton B40.

Pour ces mesures de la perméabilité au gaz et à cause des l'hétérogénéités dans le matériau, une procédure expérimentale a été réalisée; d'abord, après la préparation de six échantillons pour chaque diamètre. Nous avons effectué une seule mesure du coefficient de perméabilité pour chacun d'eux et les trois échantillons pour chaque diamètre, ayant une valeur de perméabilité plus proches de la valeur moyenne, ont été choisis. Cette approche a été réalisée dans le but de minimiser la dispersion des résultats généralement présent entre les différents échantillons du même béton et pour obtenir une variation de K_{int} due uniquement aux variations de degré de saturation.

Tab. E-1. Résultats de K_{int} des trois échantillons testés du béton B30 pour différents degré de saturation.

$K_{int}(m^2)$ Éch I	$K_{int}(m^2)$ Éch II	$K_{int}(m^2)$ Éch III	$K_{int}(MOY)$ (m^2)	Écart type (m^2)	$S_l(-)$ Éch I	$S_l(-)$ Éch II	$S_l(-)$ Éch III	$S_l(MOY)$ (-)
4,30E-16	4,40E-16	4,50E-16	4,40E-16	1,00E-17	0,008	0,008	0,008	0,008
4,00E-16	3,30E-16	3,20E-16	3,50E-16	4,36E-17	0,049	0,049	0,049	0,049
2,50E-16	2,70E-16	3,20E-16	2,80E-16	3,61E-17	0,098	0,097	0,097	0,097
2,70E-16	2,50E-16	2,30E-16	2,50E-16	2,00E-17	0,158	0,157	0,159	0,158
1,70E-16	1,80E-16	2,20E-16	1,90E-16	2,65E-17	0,217	0,215	0,219	0,217
6,00E-17	1,10E-16	1,30E-16	1,00E-16	3,61E-17	0,304	0,300	0,304	0,302
9,30E-17	6,90E-17	4,20E-17	6,80E-17	2,55E-17	0,436	0,435	0,437	0,436
1,10E-17	1,20E-17	2,50E-17	1,60E-17	7,81E-18	0,587	0,587	0,587	0,587
5,10E-18	5,90E-18	7,90E-18	6,30E-18	1,44E-18	0,690	0,697	0,690	0,692
8,10E-18	9,10E-18	1,10E-17	9,40E-18	1,47E-18	0,770	0,775	0,772	0,772
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	1	1	1

Tab. E-2. Résultats de K_{int} des trois échantillons testés du béton B32 pour différents degrés de saturation.

$K_{int}(m^2)$ Éch I	$K_{int}(m^2)$ Éch II	$K_{int}(m^2)$ Éch III	$K_{int}(MOY)$ (m^2)	Écart type (m^2)	$S_l(-)$ Éch I	$S_l(-)$ Éch II	$S_l(-)$ Éch III	$S_l(MOY)$ (-)
3,20E-16	3,40E-16	3,60E-16	3,40E-16	1,63E-17	0,008	0,008	0,008	0,008
2,40E-16	2,50E-16	2,70E-16	2,53E-16	1,24E-17	0,078	0,078	0,078	0,078
2,30E-16	2,00E-16	2,00E-16	2,10E-16	1,41E-17	0,130	0,126	0,133	0,129
1,20E-16	1,60E-16	1,70E-16	1,50E-16	2,16E-17	0,165	0,164	0,166	0,165
9,00E-17	1,50E-16	1,20E-16	1,20E-16	2,44E-17	0,323	0,320	0,324	0,322
4,60E-17	4,70E-17	5,40E-17	4,90E-17	3,55E-18	0,388	0,380	0,394	0,387
3,90E-17	5,30E-17	6,70E-17	5,30E-17	1,14E-17	0,474	0,468	0,477	0,473
6,00E-18	1,30E-17	2,00E-17	1,30E-17	5,71E-18	0,620	0,614	0,622	0,618
7,00E-19	8,50E-19	1,00E-18	8,50E-19	1,22E-19	0,772	0,766	0,774	0,770
3,80E-18	5,80E-18	7,80E-18	5,80E-18	1,63E-18	0,854	0,848	0,857	0,853
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	1	1	1

Tab. E-3. Résultats de K_{int} des trois échantillons testés du béton B35 pour différents degrés de saturation.

$K_{int}(m^2)$ Éch I	$K_{int}(m^2)$ Éch II	$K_{int}(m^2)$ Éch III	$K_{int}(MOY)$ (m^2)	Écart type (m^2)	$S_l(-)$ Éch I	$S_l(-)$ Éch II	$S_l(-)$ Éch III	$S_l(MOY)$ (-)
1,90E-16	1,90E-16	1,90E-16	1,90E-16	0,00E+00	0,008	0,008	0,008	0,008
1,30E-16	1,20E-16	1,30E-16	1,27E-16	5,77E-18	0,110	0,119	0,105	0,111
1,20E-16	7,60E-17	1,10E-16	1,02E-16	2,31E-17	0,160	0,165	0,157	0,160
9,00E-17	6,80E-17	9,70E-17	8,50E-17	1,51E-17	0,230	0,230	0,227	0,229
4,80E-17	5,90E-17	5,20E-17	5,30E-17	5,57E-18	0,277	0,286	0,277	0,280
3,30E-17	4,10E-17	4,10E-17	3,83E-17	4,62E-18	0,333	0,340	0,330	0,334
3,10E-17	3,60E-17	4,20E-17	3,63E-17	5,51E-18	0,458	0,456	0,458	0,457
1,10E-17	2,20E-17	2,20E-17	1,83E-17	6,35E-18	0,570	0,584	0,577	0,577
1,20E-18	8,60E-18	8,60E-18	6,13E-18	4,27E-18	0,709	0,720	0,714	0,714
9,10E-19	4,80E-18	2,85E-18	2,85E-18	1,95E-18	0,778	0,788	0,780	0,782
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	1	1	1

Tab. E-4. Résultats de K_{int} des trois échantillons testés du béton B40 pour différents degré de saturation.

$K_{int}(m^2)$ Éch I	$K_{int}(m^2)$ Éch II	$K_{int}(m^2)$ Éch III	$K_{int}(MOY)$ (m^2)	Écart type (m^2)	$S_l(-)$ Éch I	$S_l(-)$ Éch II	$S_l(-)$ Éch III	$S_l(MOY)$ (-)
8,10E-17	8,20E-17	7,70E-17	8,00E-17	2,64E-18	0,008	0,008	0,008	0,008
7,50E-17	6,50E-17	6,10E-17	6,70E-17	7,21E-18	0,061	0,0588	0,0586	0,059
4,40E-17	5,90E-17	5,00E-17	5,10E-17	7,55E-18	0,115	0,119	0,122	0,118
3,80E-17	3,60E-17	3,10E-17	3,50E-17	3,60E-18	0,175	0,176	0,177	0,176
2,20E-17	2,40E-17	2,90E-17	2,50E-17	3,60E-18	0,237	0,235	0,242	0,238
1,90E-17	1,20E-17	2,60E-17	1,90E-17	7,00E-18	0,335	0,33	0,34	0,335
1,40E-17	9,40E-18	4,20E-18	9,20E-18	4,90E-18	0,457	0,467	0,471	0,465
1,00E-18	8,30E-19	6,30E-19	8,20E-19	1,85E-19	0,623	0,619	0,627	0,623
2,20E-18	2,70E-18	3,65E-18	2,85E-18	7,36E-19	0,733	0,725	0,738	0,732
7,00E-19	2,00E-18	3,45E-18	2,05E-18	1,37E-18	0,819	0,811	0,83	0,820
0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	1	1	1	1

Annexe F.

Mesure de la porosité totale par intrusion de mercure.

La porosimétrie par intrusion (ou injection) de mercure constitue l'un des principaux outils d'investigation de la structure mésoporeuse et macroporeuse des matériaux. Cette technique de laboratoire simple et rapide permet de quantifier notamment la porosité volumique totale (en pourcentage), le rayon moyen et la distribution des tailles de pores des matériaux. Ces paramètres influencent aussi bien les propriétés mécaniques que la durabilité du béton par l'intermédiaire des propriétés de transfert.

Les mesures de porosité ont été effectuées au laboratoire GeM (IUT de St-Nazaire) à l'aide d'un porosimètre automatique (model: Micromeritics–AutoPoreIV) (cf. **Fig. F-1**) placé dans une salle climatisée à $20 \pm 2^\circ \text{C}$.

Le porosimètre à mercure utilisé pour nos mesures, de fonctionnement simple et commandé automatiquement par un ordinateur, possédant deux chambres, de basse pression et une autre de haute pression, permet de délivrer une pression maximum d'intrusion d'environ 414 MPa, seuls les pores dont les diamètres sont compris entre 6 nm et 358 μm sont donc accessibles avec cette appareil.

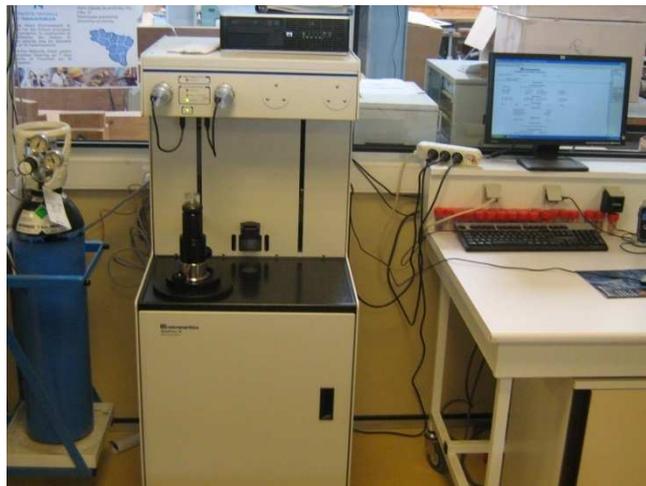


Fig. F-1. *Dispositif de mesure de la porosité par intrusion de mercure (IUT de St-Nazaire).*

Cette technique, emploie le mercure comme fluide d'intrusion non mouillant. Pendant l'expérimentation, les gaz dans les pores sont évacués puis le mercure est injecté dans l'échantillon. La pression a ensuite été augmentée à 70 Pa et elle est progressivement augmentée (intrusion de mercure) jusqu'à une pression maximale d'environ 413,68 MPa, et le volume de mercure injecté dans les pores de l'échantillon est enregistré. Ce volume est obtenu en mesurant la variation du niveau de mercure dans un tube capillaire calibré. La durée moyenne pour obtenir une pression complète lors d'un essai de porosimétrie est d'environ une heure et demie. Pour les bétons étudiés, nous avons considéré dans les calculs l'angle de contact θ égal à 130° et la tension superficielle du mercure σ_{Hg} égale à 0.485 N/m.

- **Prétraitement des échantillons.**

Afin que l'ensemble de réseau poreux soit accessible au mercure, l'eau liquide ou vapeur contenue dans le matériau doit être enlevée par un séchage préalable des échantillons.

Le prétraitement des échantillons peut être réalisé par différentes méthodes, mais une des méthodes les plus couramment pratiquées au LCPC est la procédure dite "standard" qui consiste en un étuvage sous vide à $T = 45^\circ \text{C}$ en présence de gel de silice, pendant 14 jours. Au cours de ce prétraitement, les échantillons sont régulièrement pesés (au milligramme près), afin d'évaluer leur perte relative de masse en fonction du temps et vérifier si la masse est stabilisée à l'issue du prétraitement.

Pour nos échantillons testés, cette méthode a été appliquée pendant 14 jours, suivi par un étuvage à 60°C pendant 7 jours. Nous pensons qu'une température de 45°C est insuffisante pour une évacuation complète de l'eau présente dans les pores d'un échantillon d'environ 3 cm^3 du béton.

- **Calcul de la porosité totale.**

Le cycle de l'essai débute par une mise au vide jusqu'à un certain palier après l'insertion de pénétromètre muni de l'échantillon dans la cellule de basse pression. Il se prolonge par une augmentation progressive de la pression de mercure (supérieure à la pression capillaire pour obliger le mercure à pénétrer dans les pores) à l'aide de l'azote suivant les différents paliers de pression programmés. La quantité de mercure injectée correspond alors à un volume de pores pour le diamètre donné pour chaque palier de pression. L'ensemble de pénétromètre avec et sans l'échantillon sont pesés (M_{bloc} et $M_{péné}$). L'étape suivante consiste à placer l'ensemble dans la cellule haute pression. Le volume total de l'échantillon $V_{éch}$ et le volume des pores V_{pores} sont enregistrés et la porosité totale Φ_{Hg} est donné alors par la relation suivante :

$$\Phi_{Hg}(\%) = \frac{V_{éch}}{V_{pores}} \cdot 100 = \frac{V_{éch}}{V_{péné} - \frac{M_{bloc} - M_{péné} - M_s}{\gamma_m}}$$

Où γ_m est la masse volumique de mercure et M_s est la masse sèche de l'échantillon testé.