

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté Sciences et de Technologies  
Département Génie Civil et d'Hydraulique  
Laboratoire de domiciliation Génie Civil et d'Hydraulique

**THÈSE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE**  
**DOCTORAT**

Domaine : Sciences et Techniques      Filière : Génie Civil  
Spécialité : Matériaux et Structures

**Présentée par**

**MEHAMDIA ALI**

*Intitulée*

**CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION DE LA  
DURABILITE DU BETON PAR LES ULTRASONS**

Soutenu le : .....

Devant le Jury composé de :

**Nom et Prénom                      Grade**

<b>Mr NAFA Zahreddine</b>	<b>Pr</b>	Univ. de 8 Mai 1945 - Guelma	Président
<b>Mr BENOUIS Abdelhalim</b>	<b>Pr</b>	Univ. de 8 Mai 1945 - Guelma	Encadreur
<b>Mr BELACHIA Mouloud</b>	<b>Pr</b>	Univ. de 20 Aout 1955- Skikda	Examineur
<b>Mr CHERAIT Yacine</b>	<b>Pr</b>	Univ. de 8 Mai 1945 - Guelma	Examineur
<b>Mr OUCIEF Hocine</b>	<b>Pr</b>	Univ. de Badji Mokhtar - Annaba	Examineur

**Année Universitaire : 2018/2019**

# Remerciements

Je ne savais pas que la thèse est une véritable expérience professionnelle qui demande des compétences nombreuses et de loin individuelle et qui dépasse aussi la tâche de rédiger le document jusqu'à ce que je l'ai vécue.

Je tiens, d'abord à remercier en premier lieu et avant tout, notre Dieu le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience pour effectuer le présent travail et de m'avoir entouré de personnes formidables et dans chacune de mes étapes de mon parcours, contribués d'une manière ou d'une autre, chacune à sa façon, à la réalisation de cette thèse de doctorat.

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **Abdelhalim BENOUIS**, Professeur à l'Université Guelma, pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant d'être le directeur de ce travail. J'ai pu apprécier ses compétences scientifiques et il a su me faire profiter de son expérience et de ses directives fructueuses.

Je remercie vivement Monsieur **Pr. NAFA Zahreddine** Professeur à l'Université 08 Mai 45 de Guelma pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de soutenance, je tiens à lui exprimer ma profonde reconnaissance.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements aux membres du jury, **Pr. BELACHIA Mouloud, Pr. CHERAIT Yacine et Pr. OUCIEF Hocine** pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant à la participation de l'évaluation de ce travail et de bien vouloir le juger.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe du Laboratoire de Génie Civil et hydraulique LGCH de l'Universités de Guelma, **Mahdi BENZAID, Moufida GUERDAOUI, Salima BOUKOUR**. Je ne pourrais guerre oublié de remercier vivement le **Pr. MOUSSAOUI Abdelkrim** pour l'aide morale qu'il nous a donnée.

Je voudrais tout particulièrement exprimer ma reconnaissance à mes parents, mes frères et mes sœurs, qui n'ont cessé de m'encourager et me soutenir durant tout mon parcours ainsi que ma femme.

**MEHAMDIA ALI**

## **RESUME**

La durée de vie des ouvrages en béton est liée souvent à la capacité du béton à empêcher la pénétration d'agents agressifs (sulfates, chlorures ou gaz carbonique...) dans sa structure poreuse. L'aptitude du béton à résister à ces attaques chimiques externes est conditionnée par ses propriétés de transfert (porosité, perméabilité). Ces propriétés physiques sont liées aux caractéristiques du milieu poreux (forme des pores, répartition des tailles des pores et tortuosité). Ces paramètres peuvent être qualifiés comme des indicateurs de durabilité. Il est évident que les comportements de transport sont très importants dans le contexte de la durabilité du béton. Il est donc nécessaire de se procurer un moyen fiable et rapide pour évaluer ces propriétés physiques (porosité, perméabilité) tel que les ultrasons.

Ce travail vise une contribution à la caractérisation de la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'air et la perméabilité à l'eau en utilisant la vitesse et l'atténuation des ondes ultrasonores. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les effets du rapport eau/ciment, du type des additions et du mode de cure sur les propriétés physiques étudiées ainsi que l'effet de la fréquence et du diamètre de transducteurs sur l'acquisition de la vitesse et l'atténuation ultrasonore. En effet, la porosité, la perméabilité à l'air et à l'eau augmentent avec l'augmentation du rapport E/C, qui conduisent elles mêmes à une diminution de la vitesse de surface et une augmentation de l'atténuation. La cure humide joue un rôle d'atténuateur des propriétés physiques du béton et améliore les corrélations de ces dernières avec la vitesse ultrasonique et l'atténuation. L'augmentation de la fréquence et du diamètre des transducteurs diminuent la divergence du faisceau ultrasonore et améliorent la précision de l'acquisition des vitesses. Les corrélations des propriétés étudiées avec la vitesse montrent une meilleure précision que celles avec l'atténuation.

**MOTS-CLES** : Durabilité, Ultrasons, Ondes ultrasoniques de surface, Béton

## ملخص

متانة الهياكل الخرسانية تعتمد غالبا على قدرة الخرسانة في منع تغلغل العناصر العدوانية الضارة (الكبريتات، الكلوريدات أو ثاني أكسيد الكربون ...) في بنيتها المسامية. إن قدرة الخرسانة على مقاومة هذه الهجمات الكيميائية الخارجية ترتبط بخصائصه الناقلة (المسامية، النفاذية). وترتبط هذه الخصائص الفيزيائية بدورها بخصائص الوسط المسامي (شكل المسام، وتوزيع حجم المسام، والتعرج). ويمكن تصنيف هذه المعايير كمؤشرات للاستدامة. من الواضح أن سلوكيات النقل مهمة جدا في سياق متانة الخرسانة. ولذلك فمن الضروري الحصول على طريقة موثوقة وسريعة لتقييم هذه الخصائص الفيزيائية (المسامية، نفاذية) مثل الموجات فوق الصوتية.

ويهدف هذا العمل إلى المساهمة في توصيف المسامية التي يمكن الوصول إليها في المياه ونفاذية الهواء ونفاذية المياه باستخدام سرعة وتوهين الموجات فوق الصوتية. النتائج التي تم الحصول عليها مكنت من تسليط الضوء على تأثير معامل الماء/الاسمنت ونوع الإضافات وطريقة المعالجة على الخواص الفيزيائية المدروسة وكذلك تأثير تردد و قطر محولات الاستقطاب في قياس سرعة و توهين الموجات فوق الصوتية. في الواقع، المسامية، نفاذية الهواء والماء تزداد مع زيادة معامل الماء/الاسمنت، و التي تؤدي بدورها إلى انخفاض في السرعة وزيادة في التوهين للامواج فوق الصوتية السطحية. العلاج الرطب يلعب دور المخفف للخصائص الفيزيائية للخرسانة ويحسن الترابط من هذه الأخيرة مع سرعة الموجات فوق الصوتية و التوهين. زيادة تردد وقطر محولات الاستقطاب يقلل من انفراج شعاع الموجات فوق الصوتية ويحسن من دقة استحواذ السرعة. ارتباطات الخصائص الفيزيائية المدروسة بسرعة الامواج فوق الصوتية تظهر دقة أفضل من تلك التي بالتوهين.

**الكلمات المفتاحية:** الاستدامة، الموجات فوق الصوتية، الموجات فوق الصوتية السطحية، الخرسانة

# ABSTRACT

The service life of concrete structures is often related to the ability of concrete to prevent the penetration of aggressive agents (sulphates, chlorides or carbon dioxide ...) into its porous structure. The ability of concrete to resist these external chemical attacks is conditioned by its transfer properties (porosity, permeability). These physical properties are related to the physical characteristics of the porous medium (pore shape, pore size distribution and tortuosity). These parameters can be qualified as sustainability indicators. It is obvious that transport behaviors are very important in the context of concrete durability. Il est donc nécessaire de fournir un moyen fiable et rapide pour évaluer ces propriétés physiques (porosité, perméabilité) telles que les ultrasons.

This work aims a contribution to the characterization of water-accessible porosity, air permeability and water permeability using velocity and attenuation of ultrasonic waves. The results obtained made it possible to highlight the effects of water/cement ratio, the type of additions and the mode of cure on the physical properties studied, as well as the effect of the frequency and the transducers diameter on the acquisition of ultrasonic velocity and attenuation. Indeed, the porosity, the permeability to air and water increase with the increase of the Water/Cement ratio, which themselves lead to a decrease in the surface speed and an increase in attenuation. The moist cure plays a role of attenuator of the physical properties of the concrete and improves the correlations of the latters with the ultrasonic velocity and the attenuation. Increasing the frequency and diameter of the transducers decrease the divergence of the ultrasonic beam and improve the accuracy of velocity acquisition. The correlations of the properties studied with the velocity show a better precision than those with the attenuation.

**KEYWORDS** : Durability, Ultrasonic, Surface ultrasonic waves, Concrete.

# SOMMAIRES

Liste des figures	I
Liste des tableaux	IV
Liste des symboles	V
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>I. Chapitre. I. Etat de l'art sur le matériau béton</b>	
<b>I.1</b>	<b>Introduction..... 4</b>
<b>I.2</b>	<b>Historicité ..... 4</b>
<b>I.3</b>	<b>Les composants d'un béton..... 5</b>
<b>I.3.1</b>	<b>Pâte de ciment..... 6</b>
<b>I.3.1.1</b>	<b>Le ciment..... 6</b>
<b>I.3.1.2</b>	<b>Additions minérales..... 7</b>
<b>I.3.1.3</b>	<b>L'eau..... 7</b>
<b>I.3.1.4</b>	<b>Les adjuvants..... 8</b>
<b>I.3.2</b>	<b>Les granulats..... 10</b>
<b>I.3.2</b>	<b>Malaxage des constituants..... 13</b>
<b>I.4</b>	<b>Qualités essentielles d'un béton..... 14</b>
<b>I.4.1</b>	<b>A l'état frais..... 14</b>
<b>I.4.1.1</b>	<b>Ouvrabilité..... 15</b>
<b>I.4.1.2</b>	<b>Propriétés rhéologiques..... 19</b>
<b>I.4.2</b>	<b>A l'état durci..... 22</b>
<b>I.4.2.1</b>	<b>Résistance à la compression..... 22</b>
<b>I.4.2.1.1</b>	<b>Généralités..... 22</b>
<b>I.4.2.1.2</b>	<b>Essai de résistance à la compression..... 23</b>
<b>I.4.2.1.3</b>	<b>Influence du rapport eau/ciment..... 24</b>
<b>I.4.2.1.4</b>	<b>Influence du dosage en ciment..... 26</b>
<b>I.4.2.1.5</b>	<b>Influence de la porosité..... 27</b>
<b>I.4.2.1.6</b>	<b>Influence du type de ciment..... 28</b>
<b>I.4.2.1.7</b>	<b>Influence du rapport granulats/ciment..... 29</b>
<b>I.4.2.1.8</b>	<b>Influence de l'Âge..... 30</b>
<b>I.4.2.1.9</b>	<b>Influence de la température..... 32</b>
<b>I.5</b>	<b>Durabilité..... 34</b>
<b>I.5.1</b>	<b>Principaux mécanismes de dégradation (les pathologies des bétons).... 35</b>
<b>I.5.1.1</b>	<b>la corrosion des armatures..... 35</b>
<b>I.5.1.2</b>	<b>Gel/dégel..... 35</b>
<b>I.5.1.3</b>	<b>Alcali –réaction..... 36</b>
<b>I.5.1.4</b>	<b>Carbonatation « Cancer du béton »..... 36</b>
<b>I.5.1.5</b>	<b>Autres attaque chimiques..... 38</b>

<b>I.5.1.5.1</b>	Actions des chlorures.....	38
<b>I.5.1.5.2</b>	Attaque acides.....	38
<b>I.5.1.5.3</b>	Attaque sulfatique .....	38
<b>I.5.2</b>	Les indicateurs de durabilité.....	39
<b>I.5.2.1</b>	Les indicateurs de durabilité généraux.....	39
<b>I.5.2.1.1</b>	La porosité.....	39
<b>I.5.2.1.1.1</b>	Taille des porosités .....	41
<b>I.5.2.1.1.2</b>	Connectivité .....	42
<b>I.5.2.1.1.3</b>	Tortuosité.....	42
<b>I.5.2.1.2</b>	La perméabilité.....	42
<b>I.5.2.1.2.1</b>	Principe de la perméabilité au gaz : concept de Darcy.....	42
<b>I.5.2.1.2.2</b>	Limites de la loi de Darcy.....	43
<b>I.5.2.1.2.3</b>	Perméabilité et la pression d'essai : le concept de Klinkenberg.....	44
<b>I.5.2.1.2.4</b>	Ecart entre la perméabilité à l'eau et la perméabilité au gaz des bétons...	45
<b>I.5.2.1.2.5</b>	Sous-évaluation de la perméabilité à l'eau.....	45
<b>I.5.2.1.2.6</b>	Surévaluation de la perméabilité au gaz.....	46
<b>I.5.2.1.3</b>	Absorption d'eau par capillarité.....	47
<b>I.5.2.1.4</b>	Le coefficient de diffusion des Cl.....	47
<b>I.5.3</b>	Les indicateurs de durabilité spécifiques.....	48
<b>I.6</b>	Conclusion.....	48

**II. Chapitre. II. Notions sur les ondes ultrasonores et l'atténuation**

<b>II.1</b>	Introduction.....	50
<b>II.2</b>	Mesures utilisant la propagation d'ondes.....	50
<b>II.3</b>	Éléments théoriques de la propagation des ondes acoustiques.....	51
<b>II.3.1</b>	Principes théoriques.....	51
<b>II.3.2</b>	Longueur d'onde.....	51
<b>II.3.3</b>	Impédance acoustique.....	51
<b>II.3.4.</b>	La pression et l'intensité.....	52
<b>II.4</b>	Différents types d'ondes ultrasonores.....	52
<b>II.4.1</b>	Ondes longitudinales.....	52
<b>II.4.2</b>	Ondes transversales (cisaillement).....	53
<b>II.4.3</b>	Ondes de surfaces.....	54
<b>II.5</b>	Modes d'acquisitions.....	55
<b>II.6</b>	Propagation et diffraction des ondes en milieu hétérogène.....	55
<b>II.7</b>	Emission et réception de l'onde ultrasonore.....	57
<b>II.7.1</b>	Description du faisceau ultrasonore émis .....	57
<b>II.7.1.1</b>	Zone initiale: zon de Fresnel.....	58
<b>II.7.1.2</b>	Zone distale : Zone de Fraunhofer.....	67

II.7.2	Atténuation des ondes .....	59
II.7.3	Méthodes de mesure de la vitesse et l'atténuation ultrasonore.....	60
II.8	Conclusion.....	60
<b>III.</b>	<b>Chapitre. III. Matériaux et techniques expérimentales</b>	
III.1	Introduction .....	61
III.2	Caractéristiques des matériaux utilisés.....	61
III.2.1	Ciment .....	61
III.2.2	Sable.....	62
III.2.3	Gravier.....	62
III.2.4	Eau de gâchage.....	62
III.2.5	Adjuvant.....	63
III.2.6	Les additions.....	63
III.2.6.1	Les fillers calcaire.....	63
III.2.6.2	Laitier granulé.....	64
III.2.6.3	Fumée de silice.....	65
III.3	formulation des bétons.....	65
III.3.1	Formulation des bétons ordinaires.....	66
III.3.2	Formulation des bétons autoplaçant.....	66
III.3.3	Formulation des bétons à haute performance.....	67
III.3.4	Confection des éprouvettes.....	68
III.3.5	Cures appliquées.....	69
III.4	Techniques expérimentales.....	69
III.4.1	Essai d'auscultation sonique.....	69
III.4.2	Essai de porosité accessible à l'eau.....	72
III.4.3	Essais de perméabilité.....	73
III.4.2.1	Perméabilité à l'air.....	73
III.4.2.2	Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau).....	76
III.5	Conclusion.....	77
<b>IV.</b>	<b>Chapitre. IV. Résultats des essais et discussions</b>	
IV.1	Introduction.....	78
IV.2	Essais Non Destructifs Par Ultrasons.....	78
IV.2.1	Influence du rapport E/C sur l'évolution de la vitesse des ondes de surface... ..	78
IV.2.2	Influence du type d'addition sur l'évolution de la vitesse des ondes de surface..	80
IV.2.3	Influence de la fréquence et du diamètre des transducteurs sur la vitesse.....	81
IV.2.4	Influence du rapport E/C sur l'atténuation.....	83
IV.2.5	Influence du type d'addition sur l'atténuation.....	84

<b>IV.3</b>	Porosité accessible à l'eau.....	86
<b>IV.3.1</b>	Influence du rapport E/C sur la porosité.....	86
<b>IV.3.2</b>	Influence du type d'addition sur la porosité.....	87
<b>IV.3.3</b>	Influence du mode de cure sur la porosité.....	89
<b>IV.4</b>	Perméabilité aux gaz.....	89
<b>IV.4.1</b>	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'air.....	89
<b>IV.4.2</b>	Influence du type d'addition sur la perméabilité à l'air.....	90
<b>IV.4.3</b>	Influence du mode de cure sur la perméabilité à l'air.....	91
<b>IV.5</b>	Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau).....	92
<b>IV.5.1</b>	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau.....	92
<b>IV.5.2</b>	Influence du type d'addition sur la perméabilité à l'eau.....	93
<b>IV.5.3</b>	Influence du mode de cure sur la perméabilité à l'eau.....	95
<b>IV.6</b>	Evolution de la perméabilité à l'air en fonction de la porosité.....	95
<b>IV.7</b>	Evolution de la perméabilité à l'eau en fonction de la porosité.....	96
<b>IV.8</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la porosité.....	98
<b>IV.9</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air.....	100
<b>IV.10</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'eau.....	103
<b>IV.11</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la porosité.....	107
<b>IV.12</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'air.....	110
<b>IV.13</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'eau.....	113
<b>IV.14</b>	Conclusion.....	115
	<b>Conclusions générales et recommandations</b>	117
	<b>Références bibliographiques</b>	119
	<b>Annexe A</b>	129
	<b>Annexe B</b>	130
	<b>Annexe C</b>	131
	<b>Annexe D</b>	132

## LISTE DES FIGURES

<b>Réf figure</b>	<b>Titre</b>	<b>N° page</b>
<b>Figure I.1</b>	Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire	6
<b>Figure I.2</b>	Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé	8
<b>Figure I.3</b>	Influence du dosage d'eau sur la rhéologie	9
<b>Figure I.4</b>	Utilisation des superplastifiants	9
<b>Figure I.5</b>	L'effet du dosage du superplastifiant	10
<b>Figure I.6</b>	Effets de la résistance spécifiée sur divers paramètres	12
<b>Figure I.7</b>	Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire	12
<b>Figure I.8</b>	Cycle de malaxage	13
<b>Figure I.9</b>	Accroissement de la densité du béton au cours du malaxage	14
<b>Figure I.10</b>	Certains appareils pour mesurer l'ouvrabilité	15
<b>Figure I.11</b>	Influence de la température du béton frais sur la demande en eau et sur l'affaissement	17
<b>Figure I.12</b>	Perte d'affaissement d'un béton au cours du temps	18
<b>Figure I.13</b>	Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'affaissement	19
<b>Figure I.14</b>	Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton	21
<b>Figure I.15</b>	Le rhéomètre BTRHEOM	21
<b>Figure I.16</b>	Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide	24
<b>Figure I.17</b>	Valeurs des résistances de la figure 1.15 en fonction du rapport E/C	25
<b>Figure I.18</b>	Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport E/C	25
<b>Figure I.19</b>	Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton	26
<b>Figure I.20</b>	Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton	26
<b>Figure I.21</b>	Relation entre la résistance à la compression de mortiers et la porosité calculée à partir du volume des pores de diamètre supérieur à 20 nm	27
<b>Figure I.22</b>	Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme	28
<b>Figure I.23</b>	Influence du rapport G/C sur la résistance du béton	29
<b>Figure I.24</b>	Relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10×30 cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0,5	30
<b>Figure I.25</b>	Augmentation relative de la résistance dans le temps de bétons ayant différents rapports E/C confectionnés avec un ciment portland ordinaire	31
<b>Figure I.26</b>	Augmentation de la résistance de bétons (mesurée sur des cubes modifiés de 150 mm) sur une période de plus de 20 ans ; condition de conservation humide	32
<b>Figure I.27</b>	Influence de la température de mûrissement du béton sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances	33
<b>Figure I.28</b>	Influence de la température des deux premières heures suivant la mise en place sur	34

	la résistance du béton	
<b>Figure I.29</b>	Les différents pores d'un béton, positionnement selon le milieu extérieur	40
<b>Figure I.30</b>	Echelle des porosités des matériaux cimentaires	41
<b>Figure I.31</b>	Concept de la perméabilité d'un milieu poreux selon	43
<b>Figure I.32</b>	Représentation graphique du concept de Klinkenberg	45
<b>Figure II.1</b>	Ondes ultrasonores longitudinales	53
<b>Figure II.2</b>	Ondes ultrasonore transversales (cisaillement)	53
<b>Figure II.3</b>	Dispositif expérimental pour la mesure des ondes de surface	54
<b>Figure II.4</b>	Direction de propagation d'une onde de surface	54
<b>Figure II.5</b>	Mode d'acquisition	55
<b>Figure II.6</b>	Diffraction d'une onde par hétérogénéité	56
<b>Figure II.7</b>	Diffraction multiple des ondes par l'hétérogénéité	56
<b>Figure II.8</b>	Géométrie d'un faisceau d'onde ultrasonore	58
<b>Figure II.9</b>	Représentation du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour un élément piézo-électrique de diamètre $D_s$	59
<b>Figure III.1</b>	Répartition granulométrique du ciment et des additions	64
<b>Figure III.2</b>	Dispositif expérimental pour la mesure de la vitesse et de l'atténuation des ondes ultrasonores indirectes	71
<b>Figure III.3</b>	Mesure de la vitesse d'onde indirecte par régression	71
<b>Figure III.4</b>	Dispositif pour la mesure de la porosité accessible à l'eau	73
<b>Figure III.5</b>	Vue générale du perméamètre à gaz CEMBUREAU	74
<b>Figure III.6</b>	Intérieur d'une cellule de perméabilité	74
<b>Figure III.7</b>	Dispositif de mesure de la perméabilité à l'eau	77
<b>Figure IV.1</b>	Variation de la vitesse en fonction du rapport E/C	78
<b>Figure IV.2</b>	Variation de la vitesse en fonction du type d'adition pour les BAP	80
<b>Figure IV.3</b>	Vue simplifiée d'un faisceau sonore pour un transducteur	82
<b>Figure IV.4</b>	Influence du rapport E/C sur l'atténuation des ondes de surface	83
<b>Figure IV.5</b>	Influence du type d'adition sur l'atténuation des ondes de surface	85
<b>Figure IV.6</b>	Influence du rapport E/C sur la porosité	87
<b>Figure IV.7</b>	Influence du type d'adition sur la porosité	88
<b>Figure IV.8</b>	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'air	90
<b>Figure IV.9</b>	Influence du type d'adition sur la perméabilité à l'air	91
<b>Figure IV.10</b>	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau	93
<b>Figure IV.11</b>	Influence du type d'adition sur la perméabilité à l'eau	94

<b>Figure IV.12</b>	Variation de la perméabilité à l'air avec la porosité. A) cure à l'air libre «BHP et BO», B) cure dans l'eau «BHP et BO», C) les deux modes de cure «BAP»	96
<b>Figure IV.13</b>	Variation de la perméabilité à l'eau avec la porosité. A) cure à l'air libre «BO et BHP», B) cure dans l'eau «BO et BHP», C) les deux modes de cure «BAP»	97
<b>Figure IV.14</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la porosité pour les BO	99
<b>Figure IV.15</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la porosité pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	100
<b>Figure IV.16</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la porosité pour les BAP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	100
<b>Figure IV.17</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BO	102
<b>Figure IV.18</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	103
<b>Figure IV.19</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BAP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	103
<b>Figure IV.20</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BO	105
<b>Figure IV.21</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	106
<b>Figure IV.22</b>	Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BAP A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	106
<b>Figure IV.23</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la porosité pour les BO	108
<b>Figure IV.24</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la porosité pour les BHP A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	109
<b>Figure IV.25</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la porosité pour les BAP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	109
<b>Figure IV.26</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BO	111
<b>Figure IV.27</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	112
<b>Figure IV.28</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BAP A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	112
<b>Figure IV.29</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BO	114
<b>Figure IV.30</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	115
<b>Figure IV.31</b>	Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BAP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau	115

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Réf tableau</b>	<b>Titre</b>	<b>N° page</b>
<b>Tableau I.1</b>	Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams - norme NF EN 206-1	16
<b>Tableau I.2</b>	Plage d'affaissement à spécifier pour différentes applications	17
<b>Tableau I.3</b>	Plages de seuil de cisaillement à spécifier pour diverses applications	21
<b>Tableau III.1</b>	Caractéristiques chimiques et physiques du ciment utilisé	61
<b>Tableau III.2</b>	Caractéristiques des sables utilisés	62
<b>Tableau III.3</b>	Caractéristiques du gravier utilisé	62
<b>Tableau III.4</b>	Caractéristiques chimiques	63
<b>Tableau III.5</b>	Caractéristiques physiques	64
<b>Tableau III.6</b>	Composition chimique moyenne du laitier granulé utilisé	65
<b>Tableau III.7</b>	Composition chimique et physique du fumée de silice utilisé	65
<b>Tableau III.8</b>	Composition des bétons ordinaires	66
<b>Tableau III.9</b>	Compositions et paramètres de formulation des BAP	67
<b>Tableau III.10</b>	Compositions et paramètres de formulation des BHP	68
<b>Tableau III.11</b>	Caractéristiques de différents transducteurs utilisés	71
<b>Tableau IV.1</b>	Vitesse dans les bétons en fonction du rapport E/C	79
<b>Tableau IV.2</b>	Evolution de la vitesse en fonction du type d'addition	80
<b>Tableau IV.3</b>	Rapports entre les vitesses obtenues par les différents transducteurs	81
<b>Tableau IV.4</b>	Influence du rapport E/C sur l'atténuation des ondes de surface	83
<b>Tableau IV.5</b>	Influence du type d'addition sur l'atténuation	85
<b>Tableau IV.6</b>	Influence du rapport E/C sur la porosité	87
<b>Tableau IV.7</b>	Influence du type d'addition sur la porosité	88
<b>Tableau IV.8</b>	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'air	90
<b>Tableau IV.9</b>	Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau	93

## LISTE DES SYMBOLES

<b>BO</b>	Béton ordinaire
<b>BAP</b>	Béton auto plaçant
<b>BHP</b>	Béton à haute performance
<b>BAP<sub>L</sub></b>	Béton auto plaçant à base de laitier de haut fourneau
<b>BAP<sub>F</sub></b>	Béton auto plaçant à base de fillers calcaires
<b>E</b>	Eau
<b>C</b>	Ciment
<b><math>\sigma</math></b>	Le tenseur des contraintes
<b><math>\rho</math></b>	La masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )
<b><math>\lambda</math></b>	Longueur d'onde ultrasonore (m)
<b>V</b>	Vitesse ultrasonore (m/s)
<b>f</b>	Fréquence des transducteurs (khz)
<b>D<sub>s</sub></b>	Diamètre de la source (transducteurs) (m)
<b>Z</b>	Impédance acoustique (kg/m <sup>2</sup> /s)
<b>K</b>	Le nombre d'onde acoustique
<b>P</b>	La pression d'onde acoustique (kg.m-1.s <sup>-2</sup> )
<b>I</b>	L'intensité ultrasonore (W.m <sup>-2</sup> )
<b>E</b>	Module de Young (MPa)
<b><math>\nu</math></b>	Coefficient de Poisson (sans dimension)
<b><math>\theta</math></b>	Angle de divergence en degrés
<b><math>\alpha</math></b>	Coefficient d'atténuation (dB/m)
<b>Q</b>	Facteur de qualité
<b><math>\delta</math></b>	Le décrétement logarithmique
<b>S</b>	Amplitude de l'onde ultrasonore
<b>X</b>	Le pas de mesure entre les transducteurs (m)
<b>d'</b>	Transducteur (diamètre 28.5 mm, fréquence 150 Khz)
<b>D</b>	Transducteur (diamètre 49.5 mm, fréquence 54 Khz)
<b>D'</b>	Transducteur (diamètre 49.5 mm, fréquence 25 Khz)
<b>d</b>	Transducteur (diamètre 7.5 mm, fréquence 54 Khz)
<b>UPV</b>	Vitesse des ondes ultrasonore
<b>P</b>	Porosité accessible à l'eau
<b>M<sub>sec</sub></b>	Masse éprouvette sèche
<b>M<sub>air</sub></b>	Masse éprouvette imbibée
<b>M<sub>eau</sub></b>	Masse éprouvette immergée dans l'eau
<b>K<sub>a</sub></b>	Coefficient spécifique de perméabilité apparente à l'air (m <sup>2</sup> )
<b>Q</b>	Débit volumique mesuré à la pression atmosphérique (m <sup>3</sup> /s)
<b>H</b>	Hauteur du spécimen de test dans le sens du flux (m)
<b>A</b>	Zone en coupe du spécimen de test (m <sup>2</sup> )

<b><math>\eta</math></b>	Viscosité dynamique du gaz de test
<b><math>P</math></b>	Pression d'entrée (absolue) (N/m <sup>2</sup> )
<b><math>P_{atm}</math></b>	Pression atmosphérique (Pression de sortie) (N/m <sup>2</sup> )
<b><math>h</math></b>	Profondeur de pénétration d'eau (perméabilité à l'eau) (m)
<b><math>k_i</math></b>	La perméabilité absolue
<b><math>K_v</math></b>	La perméabilité intrinsèque

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

## **Introduction générale**

Un ouvrage doit résister au cours du temps aux diverses agressions ou sollicitations (physiques, mécaniques, chimiques...) c'est-à-dire aux charges auxquelles il est soumis, ainsi qu'aux actions diverses telles que le vent, la pluie, le froid, la chaleur, le milieu ambiant... tout en conservant son esthétisme. Il doit satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

La durabilité de l'ouvrage caractérise sa capacité à conserver les fonctions d'usage, pour lesquelles il a été conçu (fonctionnement structurel, sécurité, confort des usagers), et à maintenir son niveau de fiabilité et son aspect esthétique dans son environnement, avec des frais de maintenance et d'entretien aussi réduits que possible (sous réserve de la mise en œuvre d'une maintenance préventive programmée).

La durabilité du maintien de ses fonctions doit être assortie d'une durée, temps minimal et raisonnable pour lequel l'ouvrage est conçu, qui est appelé la durée de service de l'ouvrage (ou durée d'utilisation de projet). La prise en compte de cette durabilité permet de valider et de justifier la rentabilité de l'investissement.

La durabilité directement liée à l'environnement immédiat ou futur des ouvrages et partie d'ouvrage est aujourd'hui le paramètre important à considérer pour optimiser la résistance des bétons aux influences externes : intempéries, agressivité des sols, atmosphères chimiquement agressives.

La seule durabilité intrinsèque du béton ne suffit plus à garantir la durée de service de l'ouvrage. Prescrire un béton durable nécessite donc d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales, des agressions et des attaques potentielles, qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, et de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

Il convient de ne pas assimiler la durabilité d'un produit de construction à celle de l'ouvrage. En effet, il est inutile de formuler un béton intrinsèquement durable, si sa mise en œuvre au sein de la structure n'est pas conforme aux règles de l'art et si les diverses sollicitations auxquelles il est soumis n'ont pas été correctement appréciées, ce qui conduirait à ce que l'ouvrage ne remplisse pas durablement sa fonction pendant sa durée de service requise.

La durabilité d'un ouvrage dépend de nombreux paramètres dont la qualité de sa conception, la qualité des matériaux et des produits utilisés, la qualité des dispositions constructives, de la réalisation de l'ouvrage et de la mise en œuvre des produits ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance.

La durée de vie des ouvrages en béton est liée souvent à la capacité du béton à empêcher la pénétration d'agents agressifs (sulfates, chlorures ou gaz carbonique...) dans sa structure poreuse. L'aptitude du béton à résister à ces attaques chimiques externes est conditionnée par ses propriétés de transfert (porosité, perméabilité et diffusivité). Ces propriétés physiques sont

liées aux caractéristiques du milieu poreux (forme des pores, répartition des tailles des pores et tortuosité). Ces paramètres peuvent être qualifiés comme des indicateurs de durabilité. Il est évident que les comportements de transport sont très importants dans le contexte de la durabilité du béton, et par conséquent, un certain nombre de chercheurs étudient divers mécanismes de transport afin d'améliorer la compréhension du processus de détérioration du béton. La perméabilité est l'une des caractéristiques les plus importantes du béton, en particulier dans le cas des structures de stockage. En effet, l'augmentation de la perméabilité (gaz et liquide) et la porosité de ce matériau est actuellement reconnu comme fournissant une indication fiable de leur dégradation (au moins sur un niveau qualitatif) si elle peut être d'origine mécanique et physico-chimique résultant de la matrice de ciment attaqué par des substances agressives. Les récentes préoccupations concernant la performance à long terme du béton mènent à l'intérêt porté sur les paramètres qui contrôlent la durabilité et les méthodes d'essais qui quantifient de manière significative ces paramètres.

Le test UPV, l'une des méthodes les plus anciennes pour la caractérisation du béton, est basé sur la mesure de l'amplitude et le temps de déplacement d'une impulsion d'onde ultrasonore sur une longueur de trajet connue. Le contrôle par ultrasons occupe une place importante grâce à sa commodité d'emploi et à son coût raisonnable. Il peut être considéré comme l'une des méthodes les plus prometteuses pour évaluer les structures en béton, une fois qu'il permet d'examiner l'homogénéité du matériau. En utilisant l'analyse des variations de propagation de l'onde ultrasonore vitesse et atténuation, il est possible de mesurer l'uniformité du béton, examiner l'homogénéité et facilitent également le diagnostic des défauts. Le test UPV permette l'évaluation continue des conditions du béton pendant toute la durée de vie de la structure.

Les ondes indirectes sont des ondes mécaniques se propageant parallèlement le long de la surface du matériau solide avec un mouvement de particule elliptique, elles ont une pénétration profonde dans le corps solide mieux que les ondes de Rayleigh qui caractérisent seulement les premiers centimètres de la surface, de sorte qu'elles peuvent donner un aperçu de l'état physique et hydraulique mieux que celui des ondes de Rayleigh. La profondeur de pénétration de ces ondes dépend de la fréquence des transducteurs.

On appelle atténuation le phénomène d'affaiblissement de l'intensité du signal d'ondes se propageant dans un milieu atténuant. Cet affaiblissement se manifeste par une baisse d'énergie du signal le long de son trajet dans le milieu atténuant, ce qui entraîne une diminution de l'amplitude des ondes.

Des techniques de mesure de vitesse et d'atténuation ultrasonore utilisant des transducteurs de contact qui sont couplés à un échantillon de matériau avec un agent de couplage liquide ou une liaison solide sont largement utilisées en laboratoire et en champ, le couplage adéquat est nécessaire pour transférer suffisamment l'énergie dans l'échantillon. Ces techniques ont l'avantage qu'elles peuvent être appliquées dans des situations où une grande quantité d'énergie d'onde incidente est requise ou lorsque le matériau à caractériser est très fortement

atténuant (le contact direct évite la perte d'énergie par réflexion à la première interface) et/ou lorsque les conditions environnementales ne permettent pas une autre méthode.

Cette mémoire est une contribution expérimentale à l'étude des relations entre la vitesse, l'atténuation des ondes ultrasonore indirecte, la porosité et la perméabilité pour différents compositions de béton. Ceci dans le but d'avoir la possibilité de mise en place d'estimer la porosité et la perméabilité de manière non destructif pour substituer les essais destructifs de porosité et perméabilité réalisés sur des carottes prélevées sur les ouvrages en béton.

Pour enrichir les études expérimentales dans ce mémoire, nous avons utilisé quatre différents transducteurs en fait variant le diamètre et la fréquence pour les mesures des vitesses et l'atténuation des ondes indirectes appliquées sur des poutrelles de dimension 15x15x100 cm<sup>3</sup>, deux types de perméabilité (à l'air et l'eau) et la mesure de la porosité accessible à l'eau. Ces essais expérimentaux ont été appliqués sur six compositions de béton ordinaire (différents rapport E/C), deux bétons autoplaçants (BAP1 avec filler et BAP2 avec laitier) et deux bétons à haut performance (en variant le rapport E/C), avec deux modes de conservation (à l'air libre et dans l'eau) pour chaque composition.

Le sujet est développé selon le plan suivant :

- La première partie, est une recherche bibliographique, qui est répartie en deux chapitres à savoir le premier qui présente les généralités sur le béton : définitions, pathologies, durabilité, et les indicateurs de durabilité, le deuxième portant sur les notions sur les ondes ultrasonores et l'atténuation.
- La deuxième partie porte sur le programme expérimental élaboré, où sont présentés les matériaux étudiés, les dispositifs expérimentaux, les protocoles utilisés, la description des méthodes expérimentales.
- La troisième partie est consacré aux résultats expérimentaux et interprétation en mettant en évidence l'influence de rapport E/C, les ajouts dans les BAP et le mode de cure sur les mesures de la porosité et les perméabilités (à l'air et l'eau) et leurs les corrélations avec la vitesse, et l'atténuation des ondes ultrasonore indirecte.

Ce travail sera achevé par une conclusion générale de l'ensemble des résultats tout en suggérant de nouvelles perspectives de recherche.

---

# **CHAPITRE I**

## **Etat de l'art sur le matériau béton**

---

## 1.1. Introduction

Toute structure en béton doit être capable de remplir les fonctions pour lesquelles elle a été conçue tout au long de sa durée de vie, pour atteindre cet objectif, il est souhaitable que le matériau béton puisse résister aux détériorations et aux charges d'exploitation auxquelles il peut être soumis. Les phénomènes de dégradation des ouvrages en béton sont de la plus grande importance. En effet, le vieillissement généralisé des structures lié à la pénétration des agents agressifs (tels que les sulfates, chlorures ou gaz carbonique...) favorise des dommages d'origine physico-chimique. La pénétration de ces agents polluants peut réagir avec les constituants du béton et corroder les armatures et provoquer la réduction de la durée de vie de la structure et même la ruine prématurée de l'élément de structure.

Ce chapitre est consacré à l'étude du béton, dans un premier temps, sa définition, sa composition, sa résistance sont exposées. Les principaux mécanismes de dégradation sont présentés, et enfin, la durabilité et ces différents indicateurs, et ont ce basons d'éclairé deux principaux indicateurs la porosité et la perméabilité, qui sont le but de cette recherche.

## 1.2. Historicité

L'histoire du béton montre que sa technique, bien fixée empiriquement par les Romains, avec la chaux grasse et la pouzzolane, a évolué seulement au 19ème siècle, après l'apparition des chaux hydrauliques et des ciments.

L'ingénieur Bélidor, auteur de l'architecture hydraulique (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention de la chaux hydraulique par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en Ecosse en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en France en 1830 préparent l'avènement du béton [2].

A l'origine, le béton était constitué d'un mélange de trois matériaux : le ciment, les granulats et l'eau. Dans la plupart des cas, le ciment était du ciment Portland obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, ou d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Par la suite, de petites quantités d'adjuvants chimiques ont été ajoutées au mélange afin d'améliorer certaines des propriétés du béton à l'état frais ou durci. Plus tard, d'autres matériaux de nature inorganique ont été utilisés dans le béton, pour des raisons économiques dans la plupart des cas. Ces substances inorganiques sont moins coûteuses que le ciment portland en raison de leur disponibilité à l'état naturel.

Au 20ème siècle, le béton se développera considérablement avec l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint en 1928 par Eugène Freyssinet, ouvrant ainsi la voie à une envolée de l'audace architecturale (ouvrages d'art, bâtiments, etc.).

Dans les années quatre-vingt et quatre-vingt-dix, les études relatives aux bétons à hautes performances ont montré le rôle néfaste de l'excès d'eau dans les bétons. La réduction de cette quantité d'eau, par l'emploi de défloculants et par correction de l'empilement granulaire via les ultrafines, a conduit aux gains de résistance allant jusqu'à 200 MPa et de durabilité.

De nos jours, l'étendue des exigences possibles a augmenté de façon spectaculaire. Par exemple, l'affaissement au cône d'Abrams varie de 0 pour les bétons de démoulage immédiat à plus de 25 cm pour les bétons autoplaçants. De même, les résistances requises à 28 jours en compression peuvent s'échelonner depuis des valeurs modestes, de l'ordre de 10 MPa pour certains bétons de masse, à des valeurs très élevées, supérieures à 200 MPa et plus pour certains produits spéciaux préfabriqués.

Aujourd'hui, en totale continuité avec les bétons à hautes performances, c'est un changement d'objectifs constituant une véritable révolution culturelle que proposent les bétons autoplaçants. L'étude du matériau n'est plus seulement gouvernée par l'amélioration de la résistance et de la pérennité. Toutefois ces dernières propriétés restent calées à des niveaux équivalents ou supérieurs à celles des bétons courants. Nous disposons actuellement de bétons particulièrement fluides qui peuvent être mis en œuvre sans vibration et qui sont devenues prioritaires. Ces bétons ont été initialement mis au point par des chercheurs de l'université de Tokyo dans les années 1980 [3]. Il s'agit des bétons autoplaçants (BAP) utilisés pour les coulages d'éléments verticaux (poteaux, voile) et des bétons autonivelants (BAN) destinés aux éléments horizontaux (dalles de compression, dallages, chapes flottantes). Les BAP sont utilisés entre autres pour réaliser des éléments de structure préfabriqués, des réservoirs, des plates-formes de pont, des colonnes architecturales et ainsi que des ancrages pour de grands ponts.

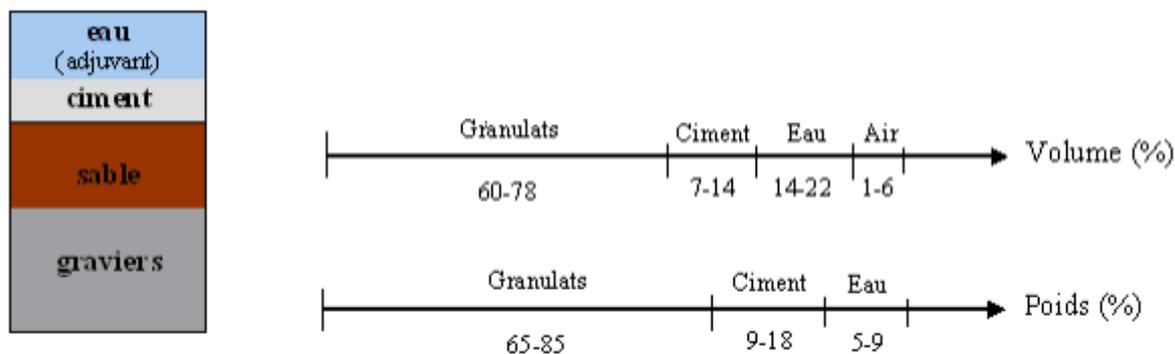
### 1.3. Les composants d'un béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, sable, gravier et, le plus souvent, adjuvants (figure I.1) qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m<sup>3</sup> ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0.5 μm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons). Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées, on utilise alors des fines complémentaires ou additions minérales [1, 4].

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.

Dans les bétons les plus simples, le squelette granulaire est composé de deux coupures seulement, un sable et un gravier. Le ciment et l'eau de gâchage, dont les proportions relatives en masse sont fixées par le rapport E/C, vont former, avec les adjuvants éventuels, la pâte de ciment qui constituera le liant du béton. Ce rapport E/C joue un rôle primordial durant les étapes de vie du béton, l'eau en excès le rend plus fluide à l'état frais mais diminue les résistances du béton durci. Des additions minérales (cendres volantes, fumées de silice,

laitiers, fillers,...) peuvent être rajoutées dans le but de modifier les propriétés du béton. L'utilisation de ces éléments fins est toujours combinée à l'emploi de superplastifiants pouvant réduire ainsi la quantité d'eau nécessaire à l'atteinte d'une fluidité suffisante. Le béton est donc un matériau hétérogène dont les constituants présentent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques différentes et dans lequel chacun de ces composants joue un rôle bien précis dans le mélange.



**Figure I.1:** Constituants et ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton ordinaire.

### 1.3.1. Pâte de ciment

La pâte de ciment correspond à l'ensemble ciment + additions + eau efficace + air + adjuvants. La pâte présente à l'intérieur du béton, joue à la fois le rôle de liant et de remplissage. Elle contribue à l'écoulement suivant un processus rhéologique lié essentiellement à sa viscosité. Celle-ci peut être présentée schématiquement comme une suspension de particules colloïdales suspendues dans un liquide newtonien qui est l'eau. Les forces colloïdales et la force de la pesanteur régissent alors complètement ses propriétés macroscopiques [5].

#### 1.3.1.1. Le ciment

Le ciment est l'ingrédient essentiel pour la formation d'un béton. C'est par définition un matériau dont les propriétés de liaison et de cohésion permettent de lier en un ensemble compact des fragments de matériaux. C'est un liant hydraulique à la base de calcaire et d'argile, qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement. Dès que le ciment et l'eau sont mis en contact, plusieurs réactions chimiques ont lieu [6]. La surface des grains de ciment se recouvre d'un film d'hydrates. Ces réactions s'opèrent alors plus lentement pendant une période dite dormante, avant d'accélérer pendant la phase de prise. C'est le constituant de base du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide.

Il existe différents types de ciments sur le marché, qui se distinguent par leurs relations avec les propriétés du béton. De ce fait, le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Pour un béton courant, les ciments les plus utilisés sont les CEM II de classe 32,5 – 32,5 R – 42,5 – 42,5 R. Ce sont des ciments bien adaptés aux usages les plus courants du bâtiment, dans les environnements 1 et 2 au sens de la norme P 18-305 [7].

### 1.3.1.2. Additions minérales

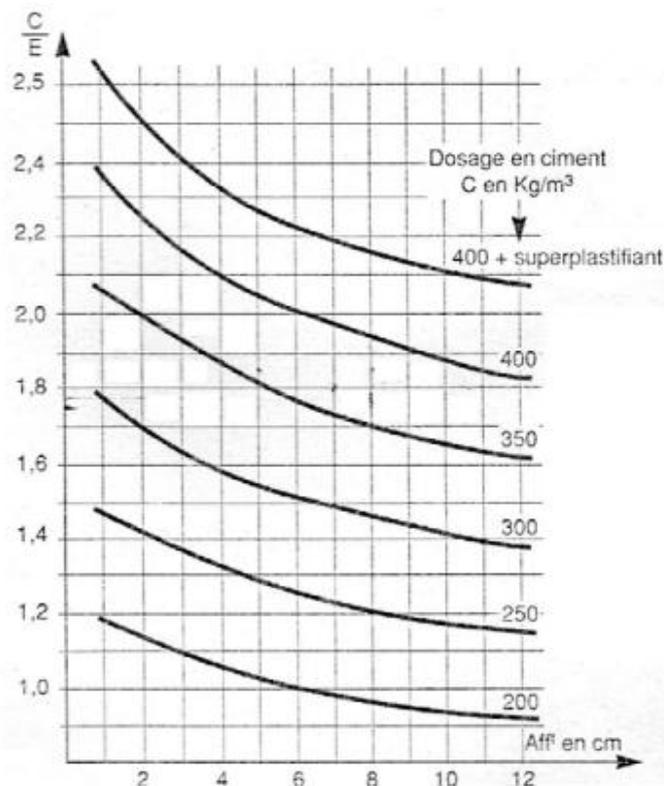
Différentes additions peuvent être mélangées au ciment pour modifier les propriétés du béton frais et durci [5]. Les principales sont les fillers calcaires, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes. Ce sont des additions fines définies comme la fraction granulométrique d'un granulat qui passe au tamis de 0,063 mm (Norme NF EN 933 - 8). En remplissant les micro-vides de l'empilement des agrégats (sable, graviers), ces additions minérales confèrent aux bétons frais de meilleures qualités de maniabilité. Ces ajouts font augmenter la cohésion et entraînent donc une diminution du ressuage et de la ségrégation du béton. Ils entraînent également une réduction de la chaleur d'hydratation et, par conséquent, le risque de fissuration thermique [8]. D'un autre côté, les additions minérales améliorent aussi l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques [9].

### 1.3.1.3. L'eau

L'eau est un des ingrédients essentiels du béton, elle intervient à toutes les étapes de la vie du matériau par ses propriétés physico-chimiques et mécaniques. 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 permettant son écoulement et son moulage et une fonction chimique qui contribue au développement de la réaction d'hydratation. L'aspect fondamental du dosage en eau reste celui de la recherche d'un optimum sur un objectif contradictoire : une meilleure résistance obtenue en réduisant la quantité d'eau et une amélioration de l'ouvrabilité en augmentant la teneur en eau. C'est lors de la recherche de cet optimum que les adjuvants peuvent jouer un rôle.

Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ces performances : résistance à la compression, durabilité.

Toutes les eaux ne peuvent pas être utilisées pour gâcher le béton. Certes, l'eau potable distribuée par le réseau du service public est toujours utilisable mais, de plus en plus souvent, nous sommes placés devant la nécessité d'utiliser une eau non potable. La norme XP P 18-303 [7], a permis de préciser à quelles conditions une eau est utilisable.



**Figure I.2:** Influence du dosage en eau à un dosage de ciment fixé [10].

L'ajout d'eau a bien sûr pour conséquence d'augmenter l'ouvrabilité du béton. A titre d'exemple, la figure (I.2) montre un abaque tiré de la méthode de formulation de Dreux et Gorisse, qui permet, pour différents dosages en ciment, d'évaluer la quantité d'eau nécessaire pour obtenir un affaissement visé.

Un ajout d'eau conduit également à une diminution du seuil de cisaillement et de la viscosité plastique, comme on peut le voir sur la figure (I.3)

#### 1.3.1.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui incorporés aux bétons à des doses qui doivent être inférieures ou égale à 5% du poids du ciment permettant d'améliorer certains de ses propriétés [11]. Ils fournissent au formulateur de béton une gamme étendue, variée et nuancée de possibilités pour faciliter la mise en œuvre des bétons, adapter leur fabrication par temps froid ou chaud, réduire les coûts de mise en œuvre, améliorer les propriétés des bétons durcis, voire même lui conférer des propriétés nouvelles. Il existe plusieurs types d'adjuvant qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les superplastifiants. Ce sont des polymères organiques solubles dans l'eau dont la synthèse réalisée par une opération complexe de polymérisation produit de longues chaînes de molécules de masses moléculaires élevées. Ces molécules vont s'enrouler autour des grains de

ciment et conduisent suivant leur nature à une répulsion électrostatique en neutralisant les charges électriques présentes à la surface des grains ou à une répulsion stérique en écartant les grains les uns des autres [5]. Ces réactions conduisent à une défloculation et à une dispersion des grains de ciment. Ainsi, le principal effet des superplastifiants est une meilleure distribution des grains de ciment et, en conséquence, le mélange d'une plus grande quantité de ciment dans un même volume d'eau.

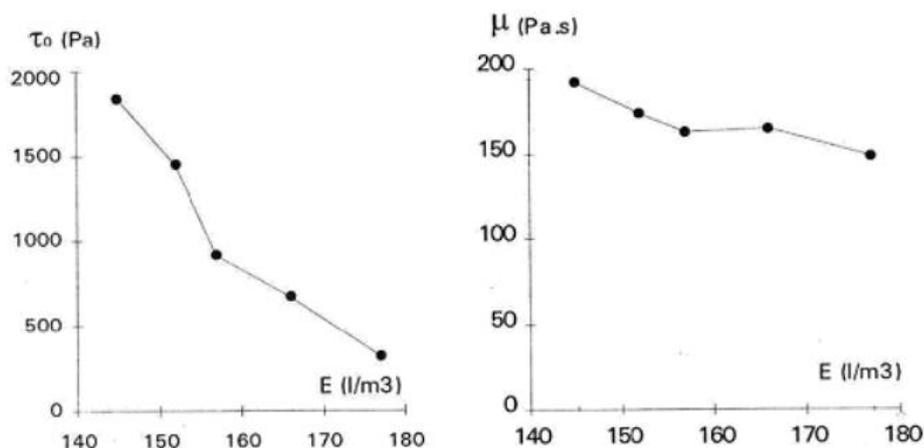


Figure I.3: Influence du dosage d'eau sur la rhéologie [12].

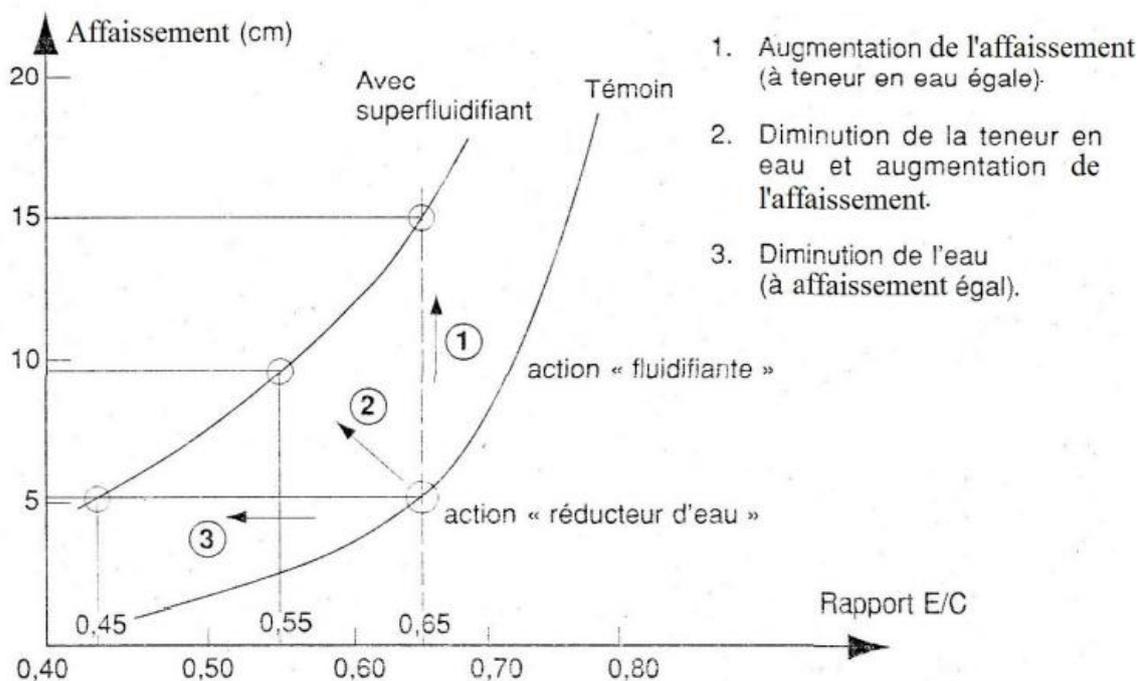
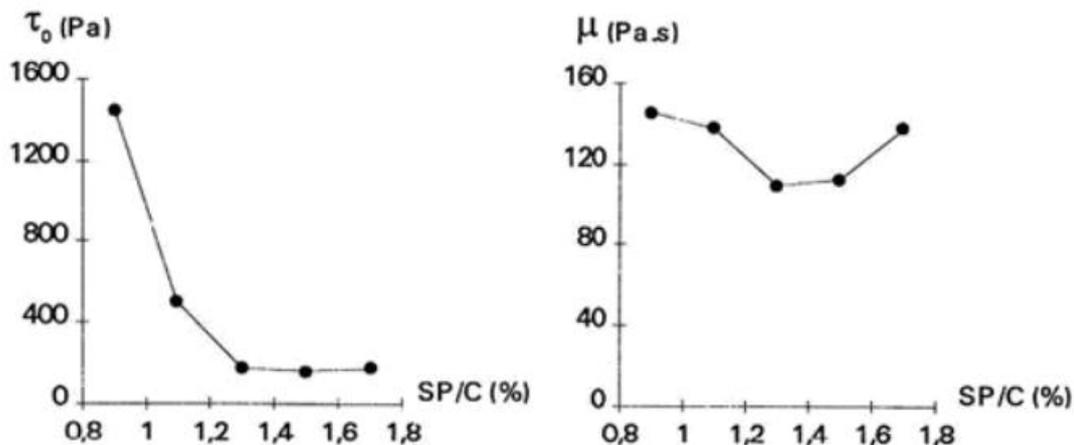


Figure I.4: Utilisation des superplastifiants [10].

Les plastifiants et les superplastifiants permettent, comme décrit dans la figure (I.4), soit de réduire le dosage en eau à maniabilité constante, induisant donc un gain de résistance en compression, soit d'augmenter l'affaissement à teneur en eau constante. Les deux types de produits sont différenciés par leur efficacité en termes de réduction d'eau, les superplastifiants étant plus efficaces.



**Figure I.5:** L'effet du dosage du superplastifiant [13].

Dans sa thèse, Hu [13] a étudié l'effet du dosage en superplastifiant sur les paramètres rhéologiques d'un béton à dosage en eau constant. Il a ainsi montré que le superplastifiant diminue le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, mais que l'effet sur la viscosité reste modeste (figure I.5).

### 1.3.2. Les granulats

Les granulats sont un constituant essentiel des bétons qui conditionne à la fois leurs caractéristiques et leur coût. Leur élaboration relève des industries extractives. Les granulats sont définis par la norme P18-540, comme un ensemble de grains minéraux, destinés à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondations, de bases de roulement des chaussées et des assises et des ballasts de voies ferrées.

On peut distinguer les granulats naturels, issus de roches meubles ou massives extraites in situ et ne subissant aucun traitement autre que mécanique (c'est-à-dire concassage, broyage, criblage, lavage, sélection) et artificiels qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais, de sous-produits industriels (laitiers, scories, etc.) ou encore de la démolition d'ouvrages de bâtiments divers en béton, souvent appelés granulats recyclés.

Les granulats ne sont pas réellement inertes et leurs propriétés physiques, thermiques et, dans certains cas, chimiques influencent les performances du béton. Par ailleurs, les granulats présentent un certain nombre de propriétés intrinsèques qui ne sont pas reliées à la nature du massif rocheux d'origine, telles la forme et la dimension des grains, la texture de surface et l'absorption, or toutes ces propriétés peuvent avoir une influence considérable sur la qualité du béton, autant à l'état frais qu'à l'état durci.

Il ne faut pas perdre de vue qu'un béton tire du granulat une bonne part de sa résistance et plus particulièrement du gros granulat. D'où la nécessité d'employer des granulats de qualité, et de dimension maximale, celle-ci devant rester compatible avec une bonne facilité de mise en œuvre. Pour pouvoir construire des ouvrages fiables, selon les normes et de haute efficacité technico-économique, il faut donc, déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, puisque ces derniers influent fortement sur les caractéristiques du béton ; à savoir les propriétés dimensionnelles, physico-chimiques et mécaniques.

On a constaté qu'un granulat peut paraître insatisfaisant sous certains aspects, alors qu'aucun problème n'a été détecté lorsqu'il a été utilisé dans le béton. Par exemple, une éprouvette de roche peut se rompre lorsqu'elle est soumise au gel, mais ne pas se briser si elle est confinée dans du béton. Cela est d'autant plus vrai lorsque les granulats sont bien enrobés d'une pâte de ciment de faible perméabilité. Cependant, les granulats considérés comme mauvais sous plus d'un aspect ne sont pas souhaitables pour la confection d'un béton de qualité. Ceci dit, les essais sur les granulats sont d'une aide précieuse lors de leur sélection pour la fabrication des bétons [14].

La phase granulaire résiste au cisaillement suivant un processus mécanique faisant intervenir l'enchevêtrement et les frottements des grains (loi de Coulomb). Ces processus dépendent à la fois des caractéristiques physiques des granulats (dimension, forme, masse, etc.) et de leur concentration dans le mélange [5]. Le seuil de cisaillement  $\tau$  du mélange est régi par le nombre et la nature des contacts entre les granulats.

En général, la forme des granulats a un effet appréciable sur la maniabilité du béton. En effet, les granulats roulés avec leurs formes présentent l'avantage d'avoir un plus petit volume de vide intergranulaire, ce qui nécessite une faible quantité de pâte de ciment pour le remplir et réduisent généralement la demande en eau. Ils présentent aussi une bonne résistance intrinsèque mais développent une liaison médiocre avec la pâte de ciment. Par contre, les granulats concassés nécessitent une plus grande quantité d'eau à cause de leurs compacités et de leurs absorptions [15-16], mais ils sont réputés avoir une excellente adhérence avec la matrice cimentaire, à cause de leurs natures chimiques, leurs porosités et leurs rugosités [12]. La figure (1.6) montre que la quantité d'eau est plus forte avec le granulat concassé, à cause de son absorption et de sa compacité. Mais dès que le mélange devient assez riche, il n'y a plus aucun effet de la forme du granulat sur le rapport optimal gravillon/sable (G/S). Enfin, la consommation en ciment est plus forte avec le granulat roulé, à cause de sa mauvaise adhérence à la pâte de ciment.

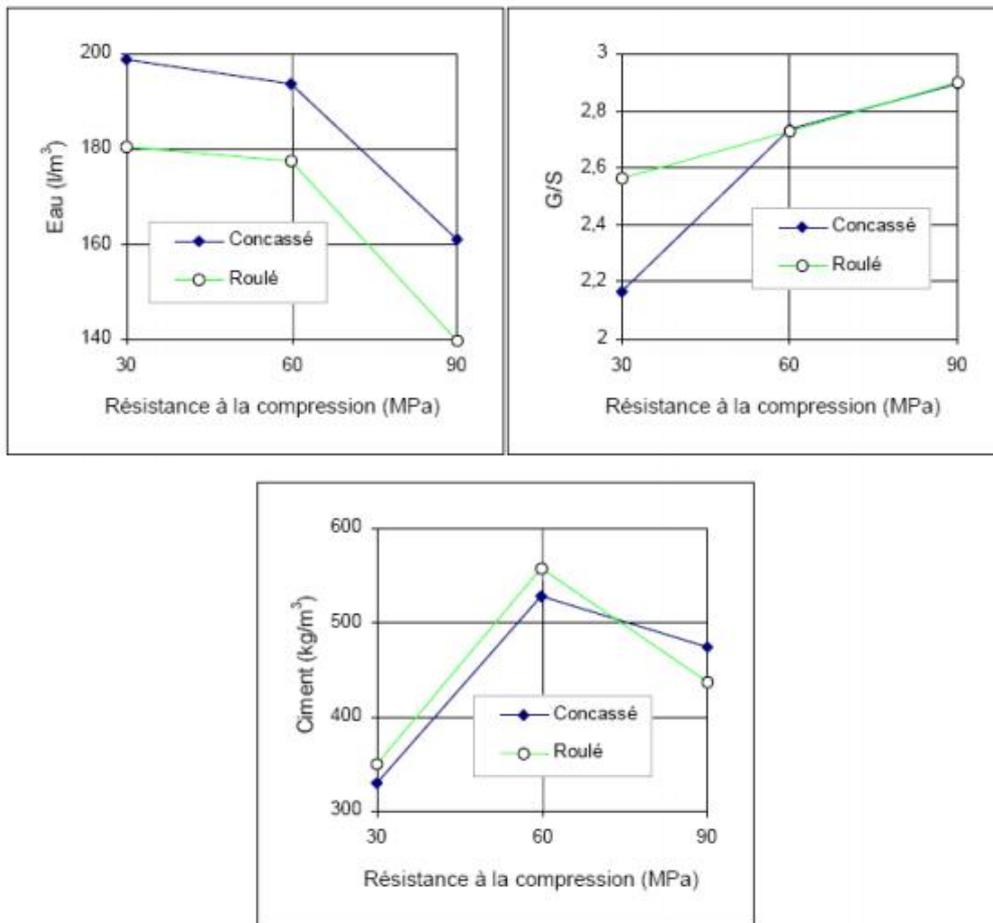


Figure I.6: Effets de la résistance spécifiée sur divers paramètres [12].

L'étendue de taille des grains des bétons peut être illustrée dans la figure (I.7).

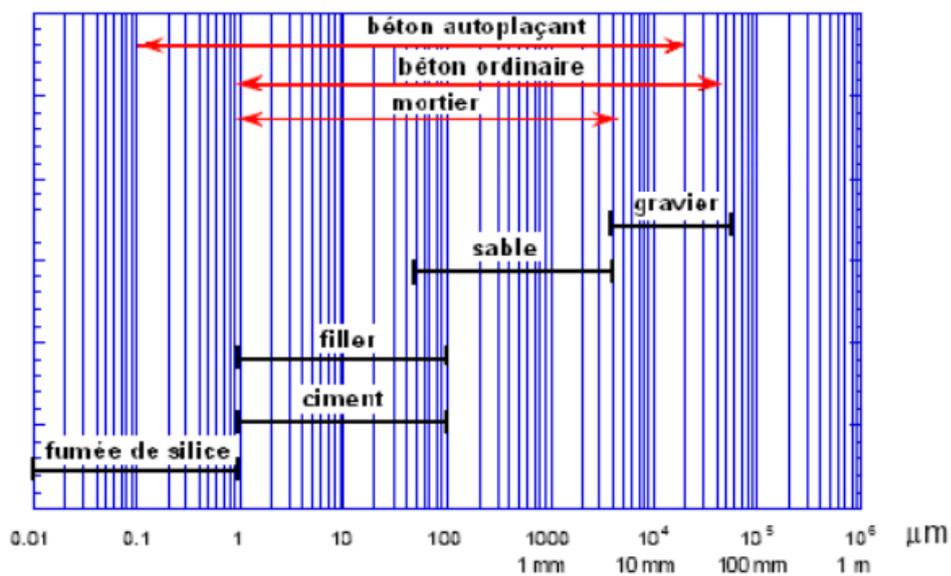


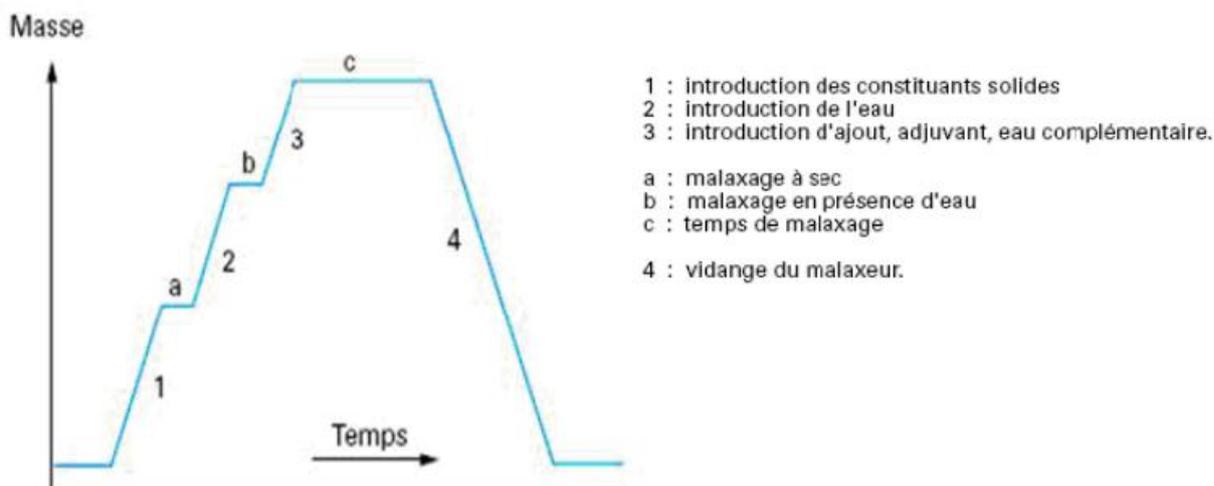
Figure I.7: Etendue de la taille des grains des composants granulaires et de la matrice cimentaire [5].

A partir de la figure (I.7), on constate clairement dans le cas des bétons ordinaires, la présence des gros granulats et l'absence de la fumée de silice.

### 1.3.3. Malaxage des constituants

Après le dosage, les constituants sont versés dans un malaxeur et mélangés à l'aide d'un système de pales de brassage. Les granulats sont d'abord introduits, suivis par les pulvérulents (ciment et/ou addition) et en dernier l'eau et l'adjuvant. L'objectif du malaxage est de répartir des constituants de nature et de tailles différentes en vue d'obtenir un mélange le plus homogène possible. La répartition homogène s'accompagne d'une structure optimale, attendue pour un mélange poly-phasique comme le béton: le ciment entre en contact avec l'eau, les petits grains s'empilent dans les vides des plus gros grains et la pâte enrobe les granulats. L'homogénéité du béton est un objectif primordial du malaxage. La durée totale du cycle de malaxage (figure I.8) couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange.

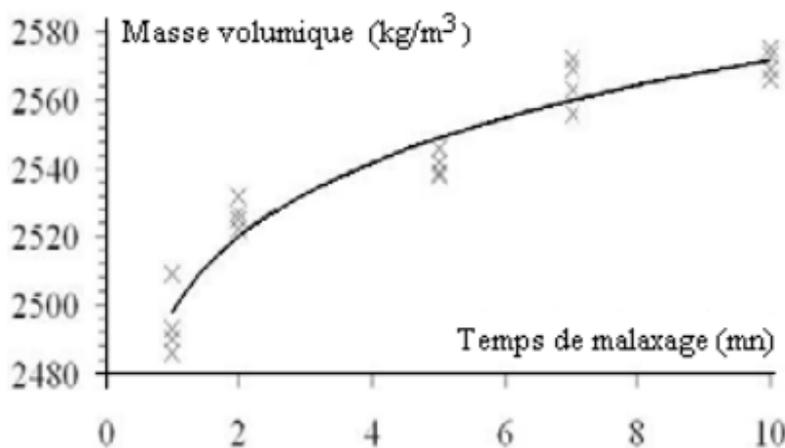
Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage sont des paramètres qui contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type de malaxeur.



**Figure I.8:** Cycle de malaxage [18].

Le temps est un paramètre prédominant pour l'homogénéisation du béton lors de son malaxage. En fonction du temps, l'homogénéisation macroscopique est rapidement obtenue, puis l'homogénéisation microscopique est atteinte au fur et à mesure. Cette dernière consiste à défloculer les agglomérations des particules fines emprisonnant une certaine quantité d'eau et d'air. Un taux de cisaillement important exercé par les pales du malaxeur et les mouvements relatifs de gros constituants au cours du malaxage peuvent fragmenter ces agglomérats et

libérer de l'eau et de l'air « piégés ». Ceci accroît donc la densité et la compacité du béton (figure I.9).



**Figure I.9:** Accroissement de la densité du béton au cours du malaxage [18].

Parfois, une perte de la maniabilité du béton peut être observée lors de la prolongation du temps de malaxage. Ces phénomènes ont reçu des explications différentes selon les auteurs :

- selon [19], l'augmentation de la surface spécifique des particules primaires, c'est à dire des amas qui restent groupés lors des mouvements de cisaillement dans le béton frais tend à accroître le seuil;
- selon [20], l'effet de défloculation importante de l'adjuvant accroît le frottement et donc le seuil.

#### 1.4. Qualités essentielles d'un béton

Le béton est un matériau composite qui fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ces caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés à l'état frais et à l'état durci.

##### 1.4.1. A l'état frais

Lors du malaxage, l'eau est l'élément qui va donner une capacité d'écoulement au squelette compact formé par l'empilement des grains solides.

Ceci signifie que l'eau va venir desserrer le squelette compact afin de donner une mobilité aux grains suffisants pour permettre la mise en œuvre souhaitée [21].

Deux façons de caractériser le béton à l'état frais sont abordées : l'ouvrabilité et les paramètres rhéologiques.

### 1.4.1.1. Ouvrabilité

Après avoir été malaxé, le béton frais doit rapidement être mis en œuvre sur le chantier pour diverses opérations : vidange dans les coffrages, serrage (par vibration, piquage...) et talochage, ... La manière dont le matériau se comporte est gouvernée par son ouvrabilité. L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange. Dreux et Festa [10] écrivent que « l'ouvrabilité du béton peut se définir comme la facilité offerte à la mise en œuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage du ferrailage ». Une bonne ouvrabilité est un gage de sécurité pour la structure en construction. En effet, selon ces auteurs, la plupart des qualités de l'ouvrage telles que la compacité et la résistance réelle du béton dans l'ouvrage lui-même, l'enrobage et l'adhérence des armatures, les parements de belle apparence, l'étanchéité, etc., dépendent de l'ouvrabilité. Au-delà de la mise en place sur le chantier.

Dans la pratique, il existe plusieurs méthodes de transport (en bétonnière, en wagonnette, en benne, en camion...) et plusieurs processus de mise en œuvre (pompage, vibration, projection, compactage...). C'est pourquoi de nombreux tests technologiques ont été proposés pour s'adapter à cette diversité. Ces essais permettent de mesurer empiriquement certaines caractéristiques dépendant de l'ouvrabilité. Nous pouvons citer quelques appareils recensés dans la littérature: le cône d'Abrams et l'étalement à la table à secousses [10]. Pour les bétons très secs, on pourra utiliser l'essai V.B., qui consiste à mesurer le temps nécessaire pour qu'un cône de béton se mette à l'horizontale dans un récipient cylindrique périphérique, une fois soumis à une vibration. Le maniabilimètre L.C.L. fonctionne sur le même principe, et la vibration est déclenchée lorsque l'on retire la trappe. Un temps long signifie que le béton est ferme. Ces essais sont présentés dans la figure (I.10).

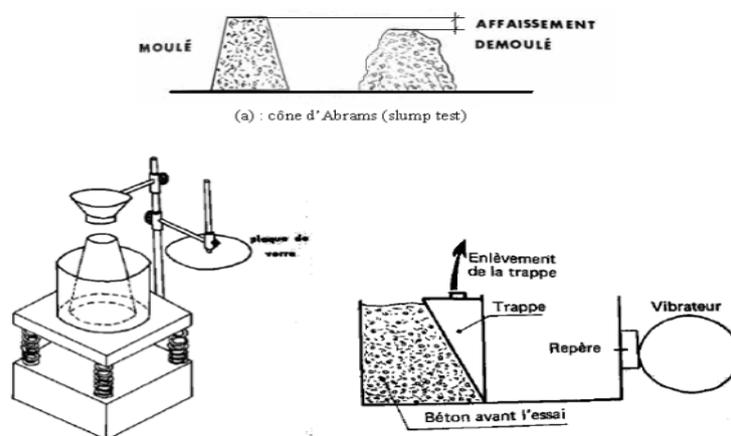


Figure I.10: Certains appareils pour mesurer l'ouvrabilité.

L'affaissement au cône d'Abrams ou « slump test » est incontestablement un des essais les plus simples et les plus fréquemment utilisés. Il est décrit dans la norme Algérienne NA 431. Pour effectuer cet essai, on remplit tout d'abord un moule en tôle tronconique ( $D = 20$  cm,  $d = 10$  cm,  $h = 30$  cm) de béton. Le remplissage est exécuté en trois couches serrées avec une tige d'acier de 16 mm de diamètre dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche. On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Plus l'affaissement est élevé, plus le béton est fluide. La norme EN 206-1 spécifie cinq classes de consistance S1 à S5 en fonction de l'affaissement (tableau I.1).

**Tableau I.1:** Classement des bétons selon la valeur d'affaissement  
au cône d'Abrams - norme NF EN 206-1

Classe	Consistance du béton	Affaissement (en mm) au cône d'Abrams
S1	Ferme	10 – 40
S2	Plastique	50 – 90
S3	Très plastique	100 – 150
S4	Fluide	160 – 210
S5	Très fluide	$\geq 220$

Lors du remplissage du coffrage, l'affaissement du béton est un des facteurs faisant varier la pression du béton sur le coffrage, paramètre important lors de leur dimensionnement. Dans le cas d'un béton serré par vibration, le temps total de vibration est relié à l'affaissement par l'expression empirique suivante [10] :

$$T_v = \frac{25}{\Phi} \left( \frac{100}{A+5} + G \right) \left( \frac{V}{10} + 2,5 \right) F \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

où :

$T_v$  : temps total de vibration (s)

$A$  : affaissement au cône d'Abrams (cm)

$V$  : volume du béton (l)

$\Phi$  : diamètre de l'aiguille vibrante (mm)

$F$  : coefficient de ferrailage (1÷1,5)

$G$  : coefficient granulaire (1÷5)

L'affaissement est aussi un bon indicateur pour classer le béton selon sa finalité. De Larrard [12] présente une gamme d'affaissement pour les bétons dans le tableau I.2.

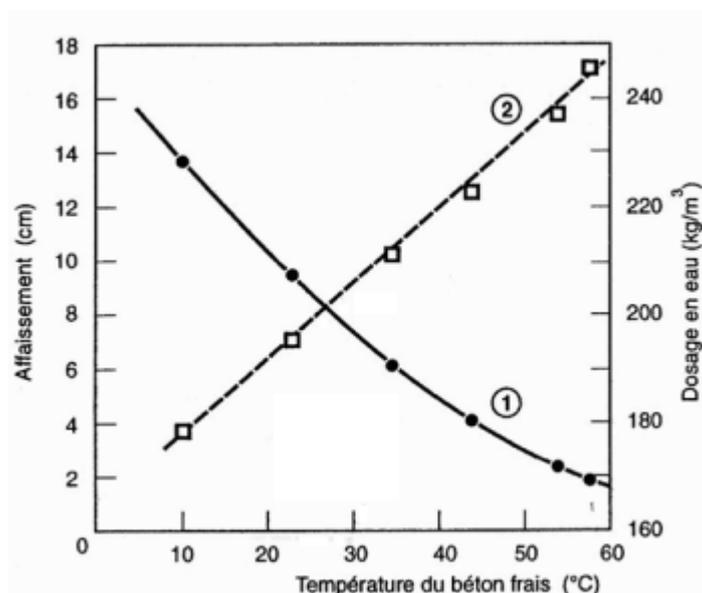
Zivkovic [24] a montré que, plus la température des constituants du béton augmentent, plus la demande en eau est importante et d'un autre côté l'affaissement diminue comme indiqué sur

la figure (I.11). Sur cette figure, la courbe 1 donne l'affaissement au cône d'Abrams pour un même dosage en eau ( $180 \text{ l/m}^3$ ) et la courbe 2 la demande en eau nécessaire à l'obtention d'un même affaissement de  $7,5 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$ . Quand la température s'élève de  $20^\circ$  à  $40^\circ$ , la demande en eau passe de  $190$  à  $220 \text{ l/m}^3$ .

**Tableau I.2:** Plage d'affaissement à spécifier pour différentes applications

Application	Affaissement désiré (mm)
Préfabrication industrielle – Bétons secs pour démoulage immédiat	0
Béton pour chaussées mis en place à la machine à coffrage glissant	20/50
Béton de résistance normale pour structures armées ou précontraintes	80/150
Béton à haute performance coulé sur chantier	180/250
Béton autoplaçant)	> 250 (étalement > 600

Zivkovic [24] a montré que, plus la température des constituants du béton augmentent, plus la demande en eau est importante et d'un autre côté l'affaissement diminue comme indiqué sur la figure 1.11. Sur cette figure, la courbe 1 donne l'affaissement au cône d'Abrams pour un même dosage en eau ( $180 \text{ l/m}^3$ ) et la courbe 2 la demande en eau nécessaire à l'obtention d'un même affaissement de  $7,5 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$ . Quand la température s'élève de  $20^\circ$  à  $40^\circ$ , la demande en eau passe de  $190$  à  $220 \text{ l/m}^3$ .

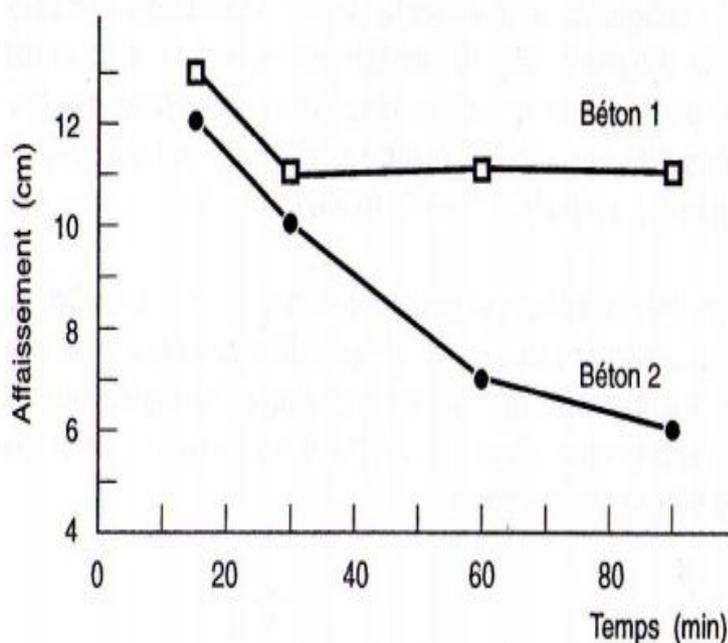


**Figure I.11:** Influence de la température du béton frais sur la demande en eau et sur l'affaissement [24].

Les mesures de l'affaissement ont été effectuées sur des bétons frais, dosés à  $300 \text{ kg/m}^3$  de CPA-CEM I A, préparés avec des constituants à différentes températures et conservés, ensuite, à  $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Le béton avant même d'être sorti du malaxeur commence à évoluer : premières réactions chimiques entre le ciment et l'eau, dessiccation, etc. A cause de cela, la valeur de l'affaissement au cône au moment de la livraison sur le chantier est toujours inférieure à celle mesurée à la sortie du malaxeur (perte d'affaissement). A l'évidence, c'est la consistance du béton au moment de sa livraison qui doit être égale à la valeur cible.

L'ingénieur qui formule un béton doit donc tenir compte du délai de livraison du béton et mesurer sa consistance trente minutes, voire une heure après la fabrication. Si le bétonnage a lieu l'été, il doit aussi tenir compte de la température. La figure 1.12 montre combien cette précaution est nécessaire car il peut y avoir des différences sensibles d'un béton à l'autre [25].

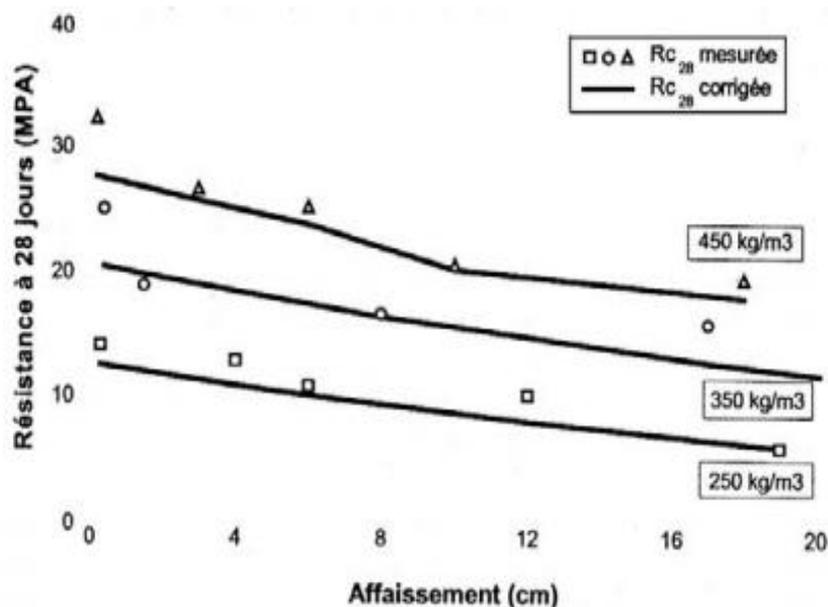


**Figure I.12:** Perte d'affaissement d'un béton au cours du temps [25].

Les bétons 1 et 2 ont les mêmes proportions ( $E=200 \text{ l/m}^3$ ,  $C=300 \text{ l/m}^3$ ) et diffèrent seulement par l'origine du ciment. Après malaxage, le béton est conservé sans agitation à  $20^\circ\text{C}$ . La consistance du béton frais est mesurée par l'affaissement au cône d'Abrams après différentes durées d'attente. A la sortie du malaxeur, les deux bétons ont une consistance très plastique. Soixante minutes après, celle du béton 1 est toujours très plastique, alors que celle du béton 2 est devenue plastique.

Makhloufi et Bouhicha [26] ont montré l'évolution de la résistance en fonction de l'affaissement sur la figure 1.13. Ils ont remarqué une diminution de la résistance à la

compression avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E/C. Pour chacun des dosages en ciment considérés de CPJ-CEM II/A d'Ain Touta, plusieurs mélanges de béton ont été confectionnés, en faisant varier le rapport E/C. Le rapport optimal G/S a été gardé constant ( $G/S = 1,47$ ) et les quantités des granulats de types calcaires concassés utilisés sont les suivantes : Sable 0/5 = 704,41 kg, Gravillon 5/15 = 399,32 kg et Gravillon 15/25 = 635,44 kg.



**Figure I.13:** Evolution de la résistance à la compression à 28 jours en fonction de l'affaissement [26].

Il convient de noter que les valeurs des résistances mesurées et corrigées sont proches les unes des autres pour les dosages en ciment considérés.

#### 1.4.1.2. Propriétés rhéologiques

De Larrard et col. [27] ont développé un rhéomètre à béton, le BTRHEOM, pour l'analyse du béton frais. Il s'agit d'étudier la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation dans un milieu homogène et continu. Selon De Larrard, le béton frais est un matériau intermédiaire entre un fluide et un empilement humide de particules. Hu [13] a montré que pour les bétons dont l'affaissement est inférieur à 10 cm, la caractérisation rhéologique n'a pas de sens. En effet, lorsqu'ils sont cisailés, de tels bétons peuvent présenter une dilatance importante et perdre leur homogénéité. Ces bétons contiennent alors un volume d'air piégé non négligeable (5-30%). Pour des affaissements supérieurs à 10 cm et si les conditions de stabilité (absence de ségrégation) sont respectées, le béton frais peut être assimilé à un fluide de type Herschel-Bulkley dont la loi fondamentale gouvernant le comportement rhéologique est décrit dans la référence [12] par:

$$\tau = \tau_0 + a \gamma^b \dots\dots\dots (I.2)$$

où

$\tau$  contrainte de cisaillement (Pa)

$\tau_0$  seuil de cisaillement (Pa)

$\gamma$  vitesse de cisaillement en ( $s^{-1}$ )

$a, b$  deux constantes physiques du modèle

Sur le plan rhéologique, le béton frais est correctement décrit par l'équation (I.2). Cependant, plusieurs difficultés sont liées à l'emploi d'un modèle à trois paramètres dans la pratique. Les auteurs ont donc proposé de l'approcher par un modèle de type Bingham intégrant seulement deux paramètres :

$$\tau = \tau_0 + \mu \gamma \dots\dots\dots (I.3).$$

où

$\tau$  contrainte de cisaillement (Pa)

$\tau_0$  seuil de cisaillement (Pa)

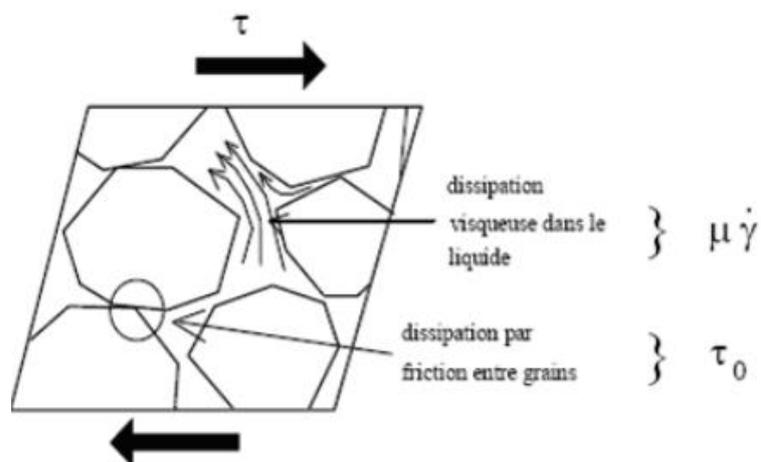
$\gamma$  vitesse de cisaillement en ( $s^{-1}$ )

$\mu$  viscosité plastique (Pa.s)

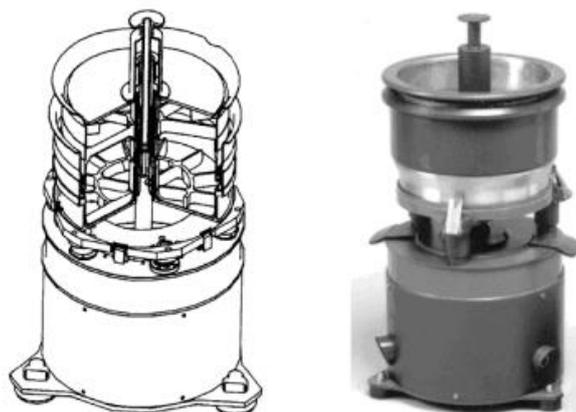
Les auteurs proposent dans la référence [12] de calculer dans un premier temps la valeur du seuil à l'aide de l'équation (1-2), puis, une fois celui-ci fixé, de déterminer la valeur de la viscosité plastique à l'aide de l'équation (1-3).

Du point de vue physique, le seuil de cisaillement est défini comme la somme macroscopique de frottements internes des grains solides. Il dépend directement du nombre et de la nature des contacts entre les grains et donc de la compacité du squelette granulaire. Au-delà du seuil, la contrainte appliquée au mélange entraîne l'écoulement qui se traduit par des mouvements relatifs entre les grains solides (le frottement) et la circulation de la phase liquide dans la porosité inter-grains. Le terme  $\tau_0$  apparaît comme la contribution de la phase solide, et le terme  $\mu\gamma$  comme celle de la phase liquide (figure I.14).

Le BTRHEOM est un rhéomètre de type plan-plan, développé au LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris). Sa conception permet de n'utiliser qu'un volume restreint de béton, environ 7 litres, (figure I.15).



**Figure I.14:** Contributions de la phase solide et de la phase liquide à la résistance au cisaillement du béton [12].



**Figure I.15:** Le rhéomètre BTRHEOM [27]

Se basant sur les expériences acquises dans le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, de Larrard [12] présente des valeurs caractéristiques du seuil de cisaillement qui permet le contrôle de l'affaissement au cône d'Abrams pour différents types de béton (tableau I.3).

**Tableau I.3:** Plages de seuil de cisaillement à spécifier pour diverses applications [12]

Application	Seuil de cisaillement spécifié (Pa)
Béton de résistance normale pour structure armée/précontrainte	800-1500
Béton à hautes performances fabriqué sur chantier	300-1200
Béton autoplaçant	200-500

Une valeur trop élevée de seuil de cisaillement signifie un manque de maniabilité. Par contre, un seuil de cisaillement trop bas peut créer certains problèmes de stabilité.

De Larrard [12] souligne que la viscosité plastique contrôle, elle aussi, divers aspects de la maniabilité du béton. Les bétons ayant une viscosité supérieure à 300 Pa.s sont difficiles à manier, à vibrer, à talocher et à travailler à la truelle de part leur aspect "collant".

### 1.4.2. A l'état durci

Le béton frais va évoluer pour aboutir au produit durci recherché. Il est incontournable de suivre l'évolution du béton sous différents aspects :

- Chimique, car il s'agit bien d'un ensemble de réactions,
- Physique, car le développement de la microstructure s'accompagne de phénomènes physiques qui définiront un état initial de la structure,
- Mécanique, car les aspects précédents conduisent à des cinétiques variables et des performances modulées en conséquence [21].

Le béton durci est un solide hétérogène formé de granulats enrobés par une pâte de ciment, il apparaît donc en première analyse, que ses propriétés mécaniques dépendent :

- de celles de la pâte liante,
- de celles des granulats,
- de l'adhérence pâte-granulats.

#### 1.4.2.1. Résistance à la compression

##### 1.4.2.1.1. Généralités

Le béton a une résistance en traction très faible, qui n'est que rarement mise en valeur dans les structures (exception faite par exemple du domaine routier). C'est donc en général la résistance en compression qui sert de caractérisation de base du béton durci. Cette résistance en compression est déterminée suivant la norme européenne NF EN 12390-3. La résistance à 28 jours après un mûrissement à l'eau sert en général de référence. La norme EN 206 définit différentes classes sous la forme CX/Y (ex: C25/30). X est la résistance caractéristique (c'est-à-dire garantie dans 95% des cas) mesurée sur cylindre 16x32 cm, tandis que Y est la résistance (du même béton) mesurée sur cube 15x15 cm.

La résistance à la compression s'explique par la réaction d'hydratation du ciment Portland, mélange de clinker et de gypse finement co-broyés. Le clinker se compose principalement des quatre minéraux suivants dans des proportions variables : silicate tricalcique  $C_3S$ , silicate bicalcique  $C_2S$ , aluminat tricalcique  $C_3A$  et aluminoferrite tétracalcique  $C_4AF$ .

La réaction du C<sub>2</sub>S et du C<sub>3</sub>S avec l'eau conduit à la formation d'hydrates dont les principaux sont les cristaux de C-S-H (CaO-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O), qui sont en majeure partie responsables du durcissement de la pâte de ciment, permettant à cette dernière de reprendre les charges extérieures et donc de participer à la résistance macroscopique du béton [28-29].

La liaison entre la pâte durcie et les granulats qu'elle enrobe conditionne également la résistance mécanique du béton. On observe, autour des granulats dans le béton durci, une zone de pâte hydratée particulière : l'auréole de transition. Cette auréole a des propriétés différentes de la pâte dans sa masse, en fonction de la porosité des granulats. Dans le cas de granulats non poreux, l'auréole comporte une couche de cristaux de grandes dimensions, très poreuse et de cohésion faible, générant des zones de faiblesse pour les bétons soumis à des actions mécaniques [30].

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment, etc.

#### **1.4.2.1.2. Essai de résistance à la compression**

Le plus courant des essais sur béton durci est la résistance à la compression, en partie parce que cet essai est facile à exécuter et aussi parce que de nombreuses caractéristiques du béton, mais pas toutes, peuvent être qualitativement reliées à sa résistance.

Toutefois, la raison principale de cet essai est l'importance intrinsèque de la résistance à la compression lors de la conception structurale. Même s'il est universellement utilisé dans le domaine de la construction, l'essai de résistance à la compression présente quelques inconvénients, mais il constitue, à parler franc, un élément du bagage culturel de l'ingénieur [31].

Les résultats de l'essai de résistance à la compression peuvent être affectés par différents paramètres : le type d'éprouvette et ses dimensions, le type de moule, de mûrissement, la préparation des faces d'essai sur lesquelles s'exerce la compression, la rigidité de la presse, la vitesse d'application de la charge. Pour toutes ces raisons, les essais doivent être effectués selon une procédure bien précise sans dévier des spécifications imposées.

Les essais de résistance à la compression effectués sur des éprouvettes préparées de façon normalisée, incluant un serrage ou un compactage à 100% et un mûrissement dans l'eau pendant une période donnée, donnent des résultats représentant la qualité du béton. Bien sûr, le béton dans la structure peut présenter une qualité inférieure, par exemple, par suite d'une mauvaise mise en œuvre, d'un compactage ou vibration inadéquats, d'un phénomène de ségrégation ou d'un mauvais mûrissement. Ces effets sont importants si l'on désire savoir à quel moment on peut décoffrer, pour suivre la construction ou mettre la structure en service. Pour cette raison, les éprouvettes d'essai sont mûries dans des conditions se rapprochant le plus possible de celles existant dans la structure réelle.

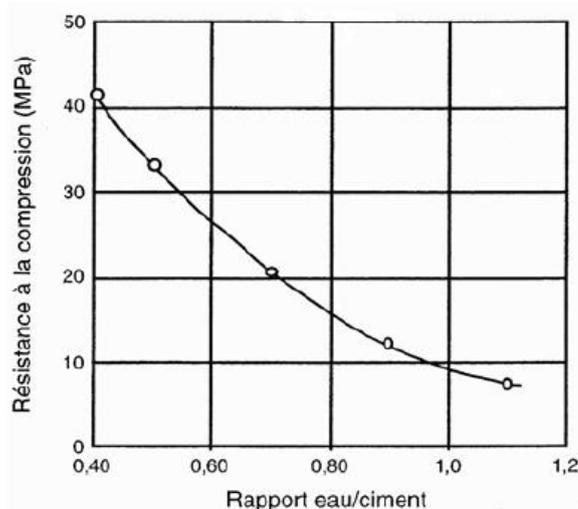
Les éprouvettes doivent être des éprouvettes cylindriques. Les plateaux ou contre plateaux de la presse doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celles des faces de l'éprouvette soumise à l'essai.

Le temps d'attente entre le moment où les éprouvettes sont sorties de l'eau et celui de l'exécution de l'essai de compression ne doit pas dépasser une heure, afin d'éviter la dessiccation des éprouvettes, sinon, des précautions doivent être prises.

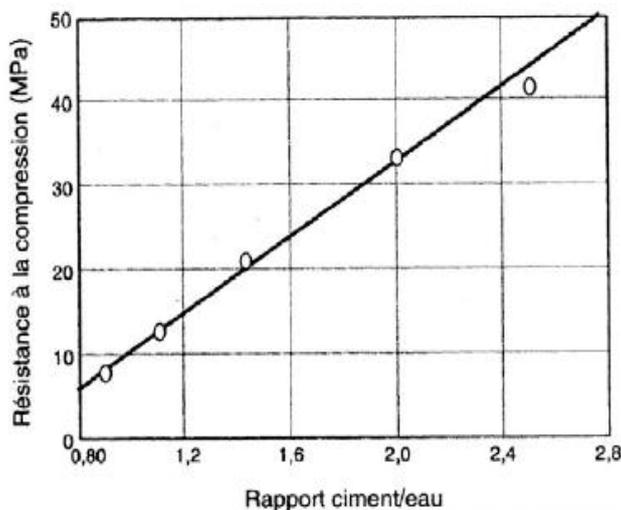
#### 1.4.2.1.3. Influence du rapport eau/ciment

Le rapport eau/ciment (E/C) d'un matériau à matrice cimentaire comme le mortier et le béton peut représenter en première approximation la qualité de la matrice cimentaire. Nous présentons dans cette section des résultats, issus de la littérature, d'essais de compression simple, réalisés sur mortiers (ou bétons) avec différents rapports E/C.

La figure 1.16 montre que la courbe représentant la résistance en fonction du rapport E/C a approximativement la forme d'une hyperbole. Cette relation est valable pour n'importe quel béton quels que soient le type de granulat et l'âge. La résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue. Une des propriétés géométriques d'une hyperbole ( $y=k/x$ ) est que la relation existant entre  $y$  et  $1/x$  est linéaire. La relation entre la résistance et le rapport C/E est donc approximativement linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre environ 1,2 et 2,5. Cette relation linéaire, tout d'abord suggérée par Neville [32], a été confirmée par Alexander et Ivanusec [33] et par Kakizaki et al [34]. Cette relation est plus facile à utiliser que la courbe représentant le rapport eau/ciment, particulièrement lorsqu'une interpolation est nécessaire. La figure (I.17) présente les valeurs de la figure (I.16) en fonction du rapport ciment/eau porté en abscisses. Les valeurs indiquées sont applicables uniquement pour un ciment donné, la relation entre la résistance et rapport ciment/eau doit donc être déterminée pour tout autre cas pratique.

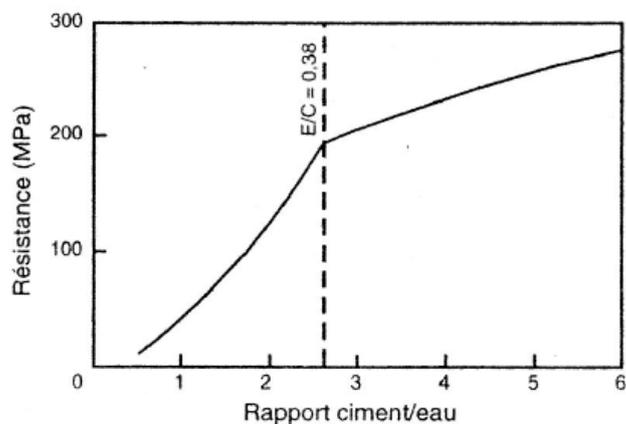


**Figure I.16:** Relation entre la résistance à la compression à 7 jours et le rapport E/C d'un béton confectionné avec un ciment portland à durcissement rapide [14].



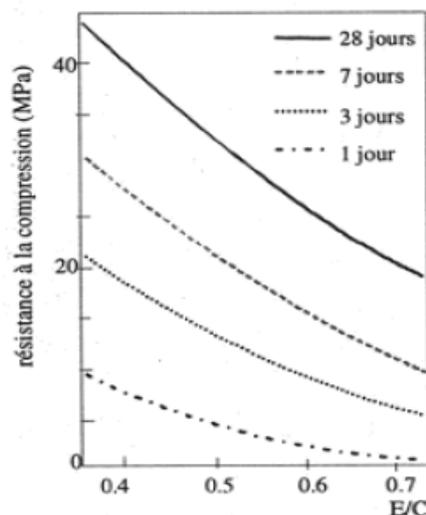
**Figure I.17:** Valeurs des résistances de la figure 1.15 en fonction du rapport E/C [14].

Nielsen (1993) [35] a montré que la linéarité de la relation entre la résistance et le rapport C/E n'est plus valable pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, ce qui correspond à un rapport E/C égale à 0,38. Comme on le voit sur la figure 1.18, pour des rapports C/E supérieurs à 2,6, la relation avec la résistance est quelque peu différente même si elle demeure linéaire.



**Figure I.18:** Relation entre la résistance calculée d'une pâte pure de ciment et le rapport E/C [35].

Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton [36]. La figure I.19 montre que la résistance à la compression du béton est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue et que l'âge du béton est plus grand [21].



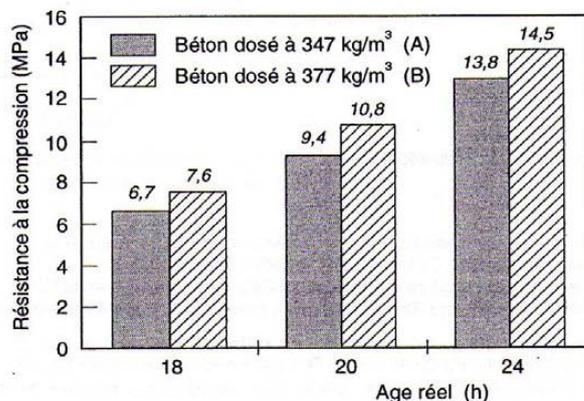
**Figure I.19:** Influence du rapport E/C sur la résistance à la compression du béton [21].

La résistance a été mesurée sur des cylindres de 15x30 cm et les bétons ont été préparés avec un ciment de type I (ASTM), sans air entraîné.

#### 1.4.2.1.4. Influence du dosage en ciment

Pour une même ouvrabilité, une augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C de ce béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court terme.

La figure (1.20) illustre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme et sur le rapport E/C du béton [25]. En effet, pour obtenir le même affaissement (7cm), le béton dosé à 377 kg/m<sup>3</sup> de ciment a demandé 192 l/ m<sup>3</sup> d'eau, soit un rapport E/C de 0,51, alors qu'il a fallu 186 l/ m<sup>3</sup> d'eau pour le béton dosé à 347 kg/m<sup>3</sup> de ciment, soit un rapport E/C de 0,54. En se référant à la figure (1.19), il est alors possible d'expliquer les résultats présentés par la figure (I.20) qui montrent clairement l'accroissement des résistances d'un béton avec l'augmentation de son dosage en ciment.

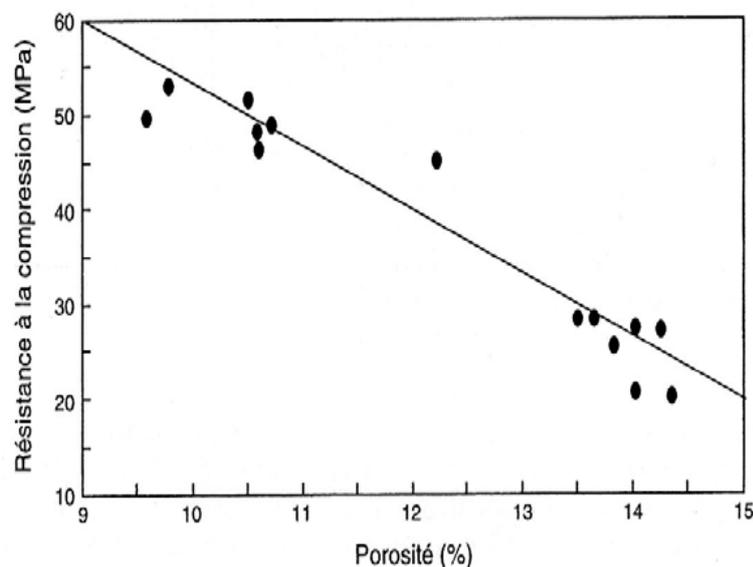


**Figure I.20:** Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton [25].

Les bétons ont été gâchés avec  $347 \text{ kg/m}^3$  (A) et  $377 \text{ kg/m}^3$  (B) de CPJ-CEM II 42,5 R et les résistances ont été mesurées sur des éprouvettes  $11 \times 22 \text{ cm}$  confectionnées dans des moules en carton.

#### 1.4.2.1.5. Influence de la porosité

La résistance du béton est fondamentalement dépendante du volume des vides qu'il comporte. L'influence de la porosité de la pâte de ciment hydraté sur la résistance a fait l'objet de plusieurs recherches. L'application directe des résultats de laboratoire, déterminés à partir d'essais sur des éprouvettes de pâte pure confectionnées avec soin, à des éprouvettes de béton doit être faite avec prudence, mais la compréhension de l'effet de la porosité sur la résistance de la pâte de ciment hydraté est importante. Il n'y a aucun doute que la porosité, définie comme étant le volume total de l'ensemble des vides supérieurs à ceux des vides de gel et exprimée en pourcentage du volume global de la pâte de ciment hydraté, est un des facteurs principaux influençant la résistance de la pâte de ciment. Une relation linéaire entre la résistance et la porosité a été établie par Rossler et Odler [37], pour des valeurs de porosité comprises entre 5 et 28%. L'effet des vides d'un diamètre inférieur à 20 nm semble négligeable. La relation entre la résistance du mortier et la porosité, en se basant sur le volume des vides de plus de 20 nm de diamètre, est présentée à la figure (I.21). L'effet de la distribution de la dimension des vides sur la résistance doit donc être pris en compte en plus de la porosité totale. De façon générale, pour une porosité donnée, la diminution de la dimension des pores entraîne une augmentation de la résistance de la pâte de ciment.



**Figure I.21:** Relation entre la résistance à la compression de mortiers et la porosité calculée à partir du volume des pores de diamètre supérieur à 20 nm [38].

Strictement parlant, la résistance du béton est influencée par le volume de tous les vides contenus dans le béton : air occlus, pores capillaires, pores de gel et air entraîné [14].

La mise en place du béton engendre toujours une certaine quantité d'air occlus. Ce volume dépend de l'énergie de serrage, plus l'énergie de serrage est importante, plus il sera possible de réduire la quantité d'air occlus.

La quantité d'air occlus varie dans un béton courant entre 1 et 2.5 %, si l'on réalise que 1 % d'air, occupant le même volume que dix litres d'eau, réduit pareillement la résistance à la compression, on conclut à l'évidence que l'air occlus dans un béton doit toujours être mesuré et pris en compte [25].

#### 1.4.2.1.6. Influence du type de ciment

La démarche de formulation d'un béton passe par le choix du type de ciment. L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la figure 1.22. Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera, à dosage identique dans le béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R, c'est-à-dire que, plus la classe de résistance est élevée, plus les résistances sont élevées, à toutes les échéances. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM I 52,5, tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes [25].

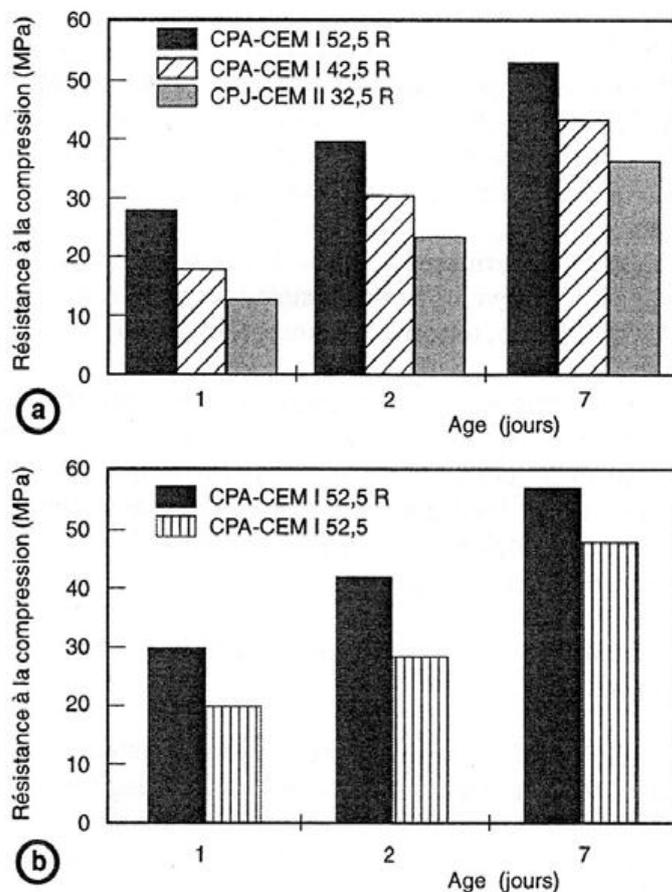
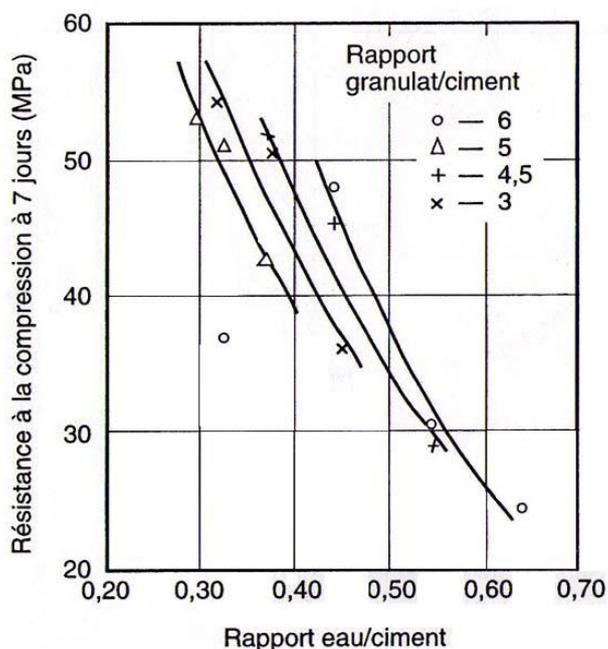


Figure I.22: Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme [25].

### 1.4.2.1.7. Influence du rapport granulat/ciment

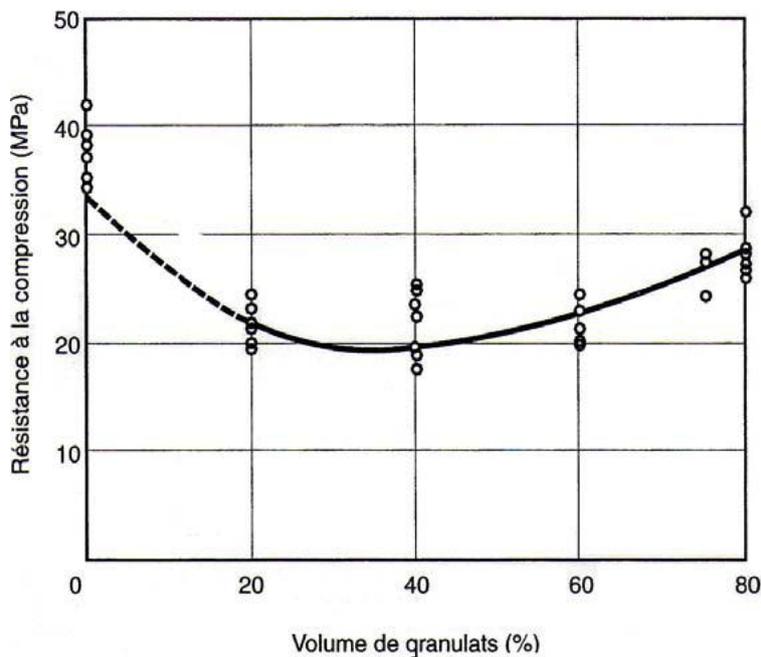
Le rapport granulat/ciment (G/C) est un facteur de deuxième importance quand à la résistance, mais, pour un rapport E/C constant, Neville [14] a montré qu'un béton plus faiblement dosé était plus résistant (figure I.23).



**Figure I.23:** Influence du rapport G/C sur la résistance du béton [14].

Les raisons de ce comportement ne sont pas bien connues. Dans certains cas, une partie de l'eau peut être absorbée par le granulat : plus il y a de granulat, plus la quantité d'eau absorbée est importante, ce qui contribue à réduire le rapport eau/ciment réel du béton. Dans d'autres cas, une plus forte teneur en granulats contribue à diminuer le retrait et le ressuage, ce qui diminue les désordres dans les liaisons granulat et pâte de ciment. De même, les modifications thermiques dues à la chaleur d'hydratation du ciment sont plus faibles [39]. L'explication la plus probable provient toutefois du fait que la teneur totale en eau par mètre cube de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment que dans un béton fortement dosé en ciment. Il en résulte que le pourcentage de vides par rapport au volume total de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment et que ce sont justement ces vides qui ont un effet négatif sur la résistance.

Les études portant sur l'influence de la teneur en granulats sur la résistance des bétons, pour une qualité de pâte de ciment donnée, indiquent que, lorsque le volume des granulats (exprimé en pourcentage du volume total) augmente de 0 à 20 %, il y a une diminution graduelle de la résistance à la compression alors que, entre 40 et 80 %, on constate une augmentation [40]. L'allure générale de ce comportement est représentée à la figure I.24. Cette tendance se vérifie quel que soit le rapport eau/ciment [41].

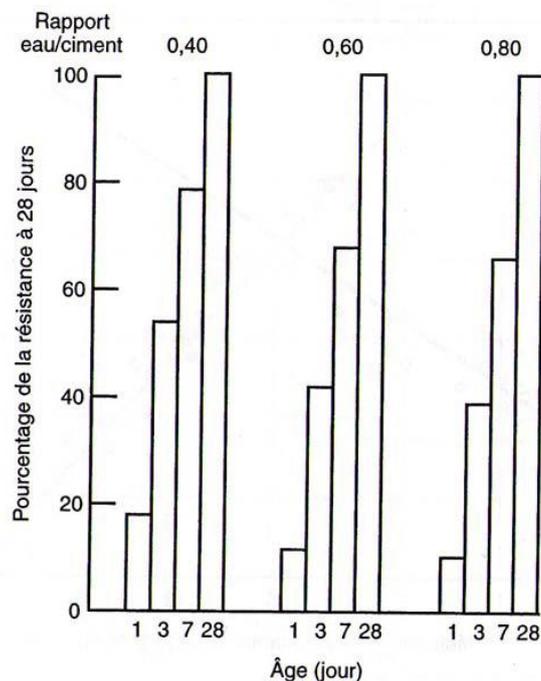


**Figure I.24:** Relation entre la résistance à la compression de cylindres de béton (10×30 cm) et le volume de granulats pour un rapport E/C constant de 0,5 [40].

Stock et col [40] ont aussi publié quelques expériences originales dans lesquelles ils ont réalisé une série de bétons avec différents volumes de granulats de même granulométrie, liés par la même matrice. Ils ont évité la ségrégation dans les mélanges fluides par une mise en rotation des moules après mise en place du matériau. Malheureusement, les essais de résistance à la compression sur les éprouvettes cubiques ont donné des résultats assez dispersés. Il est à noter que l'effet du granulat, qui n'est pas monotone, peut être modifié par une augmentation de l'air occlus quand l'ouvrabilité diminue [42].

#### 1.4.2.1.8. Influence de l'Âge

WOOD S.L [47] a montré que l'augmentation de la résistance (exprimée en pourcentage de la résistance à long terme) des bétons à faible rapport E/C est plus rapide que celle des bétons ayant un rapport E/C plus élevé (figure I.25). Ceci s'explique par le fait que les grains de ciment sont plus près les uns des autres et que le réseau de gel continu s'établit plus rapidement.



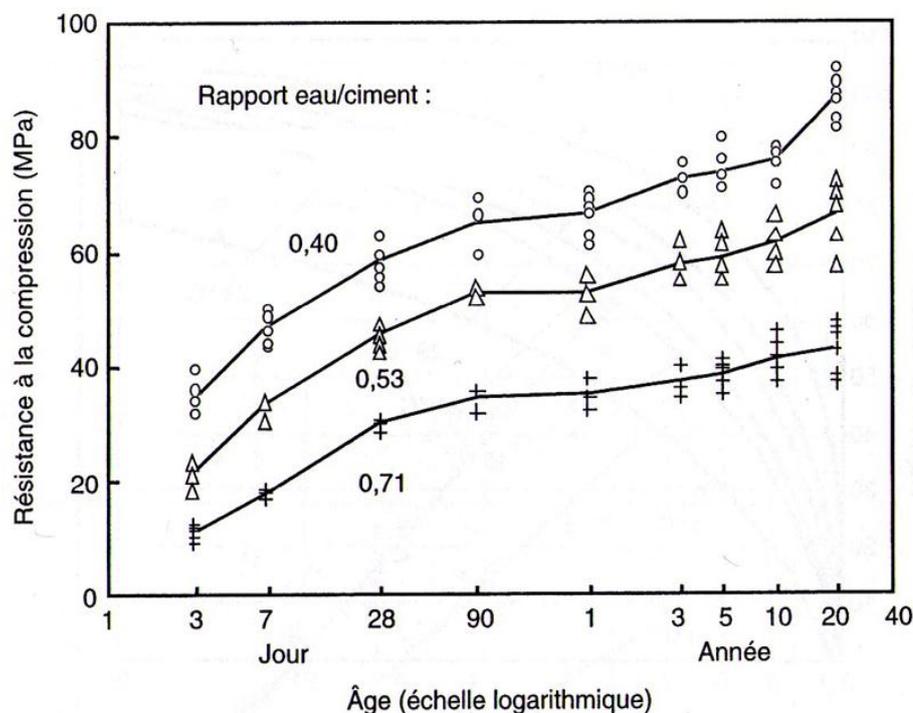
**Figure I.25:** Augmentation relative de la résistance dans le temps de bétons ayant différents rapports E/C confectionnés avec un ciment portland ordinaire.

Il est important de connaître l'évolution de la résistance en fonction du temps lors de la mise en service d'une structure, c'est-à-dire lorsque cette dernière devra supporter, à un âge plus éloigné, la charge totale pour laquelle elle a été dimensionnée. Dans ce cas, le gain de résistance après l'âge de 28 jours peut être pris en compte lors du dimensionnement de la structure. Dans d'autres situations, comme dans le cas des bétons précontraints, préfabriqués ou lorsque les coffrages doivent être enlevés rapidement, il est important de connaître la résistance au jeune âge.

La figure 1.26 présente l'évolution de la résistance en fonction du temps pour des bétons de rapports E/C de 0,40, 0,53 et 0,71 confectionnés avec un ciment de type I et conservés constamment dans l'eau [47].

En ce qui concerne la résistance à long terme, les ciments portland américains fabriqués au début du 20<sup>ème</sup> siècle (ayant une forte teneur en  $C_2S$  et une faible surface spécifique) présentaient une augmentation de la résistance pour des bétons sur chantier proportionnelle au logarithme de l'âge jusqu'à 50 ans. La résistance à 50 ans était typiquement 2,4 fois celle mesurée à 28 jours. Toutefois, depuis les années trente, les ciments ayant une plus faible teneur en  $C_2S$  et une plus grande surface spécifique atteignent leur résistance maximale entre 10 et 25 ans et, par la suite, perdent un peu de cette résistance. Les ciments portland allemands fabriqués en 1941 et utilisées pour des applications extérieures ont présenté après 30 ans une résistance égale à 2,3 fois celle mesurée à 28 jours. L'augmentation relative de la résistance était plus importante pour les rapports eau/ciment élevés. En comparaison, les

ciments à base de laitiers de haut fourneau permettaient une augmentation de l'ordre de 3,1 fois [48, 78].

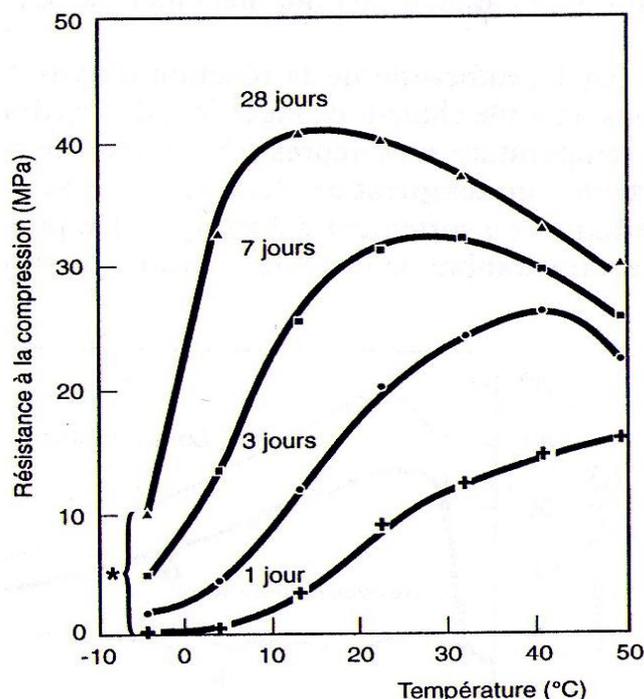


**Figure I.26:** Augmentation de la résistance de bétons (mesurée sur des cubes modifiés de 150 mm) sur une période de plus de 20 ans ; condition de conservation humide [47].

#### 1.4.2.1.9. Influence de la température

L'influence de la température de fabrication puis de mûrissement du béton sur ses résistances à court et à long terme a fait l'objet de plusieurs études au cours des soixante dernières années. De façon générale, toutes ces études [50-51] ont montré que : plus la température de fabrication et/ou de mûrissement est élevée, plus la résistance à court terme est élevée. Alors qu'à long terme, l'influence de la température est inversée, c'est-à-dire que plus la température initiale est élevée, moins bonnes sont les résistances.

La figure 1.27 montre que plus la température de fabrication et de mûrissement du béton est élevée, plus la résistance à un jour de ce béton est élevée ; alors que pour les âges de trois à vingt-huit jours l'influence de la température change radicalement. En effet, pour chacun des âges étudiés à partir de trois jours, il existe une température optimale à laquelle correspond le maximum de résistance. En fait, cette température optimale de mûrissement diminue lorsque l'échéance considérée augmente. Cependant, les causes à l'origine des réductions de résistances observées à long terme pour les bétons mûris à des températures élevées sont beaucoup plus complexes et suscitent encore aujourd'hui des questions [25].



\*Béton fabriqué à 4°C et conservé immédiatement à -4°C

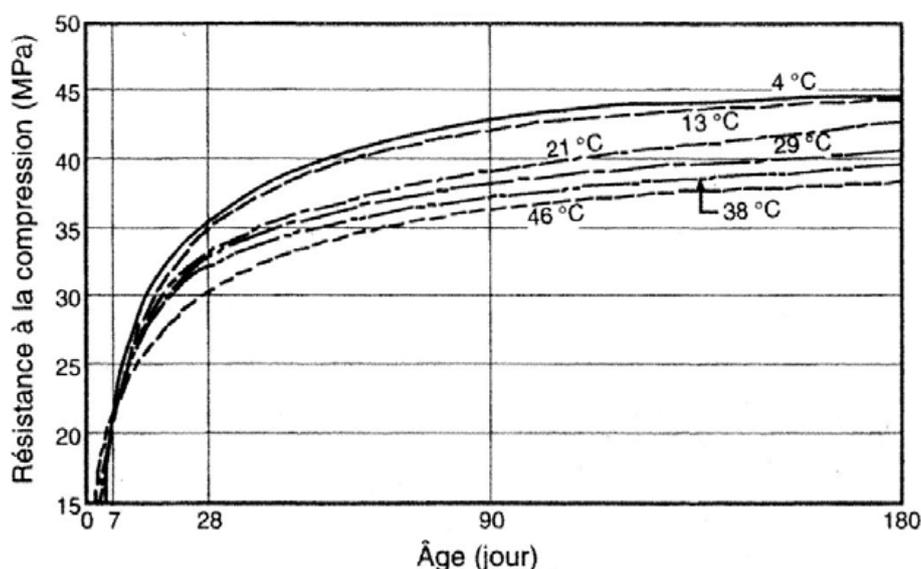
**Figure I.27:** Influence de la température de mûrissement du béton sur la résistance à la compression d'un béton à différentes échéances.

Bien qu'une température plus élevée durant la mise en place et la prise augmente la résistance au très jeune âge, elle peut avoir un effet inverse sur la résistance après 7 jours. En effet, une hydratation initiale rapide peut conduire à la formation de produits d'hydratation présentant une structure physique moins compacte, probablement plus poreuse, de sorte qu'un pourcentage de pores restera non rempli. En se basant sur la règle du rapport gel/espace, cela conduira à une résistance plus faible comparée à celle d'une pâte de ciment moins poreuse, hydratée lentement, dans laquelle un rapport gel/espace élevé sera éventuellement atteint.

Cette explication sur les effets néfastes d'une température initiale élevée sur la résistance à long terme a été avancée par Verbeck et Helmuth [52], qui suggèrent que la vitesse initiale d'hydratation rapide à des températures plus élevées retarde l'hydratation subséquente et cause une distribution non uniforme des produits d'hydratation à l'intérieur de la pâte. En effet, à une vitesse initiale d'hydratation élevée, les produits d'hydratation n'ont pas suffisamment de temps pour diffuser loin du grain de ciment et pour se précipiter uniformément dans l'espace interstitiel (comme c'est le cas pour des températures plus basses). Par la suite, une concentration élevée de produits d'hydratation se retrouve au voisinage des grains qui s'hydratent, ce qui retarde leur hydratation subséquente et affecte défavorablement la résistance à long terme. La présence de C-S-H poreux au sein des grains de ciment a été confirmée par des images par électrons rétrodiffusés [52-53].

La figure I.28 présente les résultats cités par Neville [14], sur l'effet de la température durant les deux premières heures suivant le malaxage sur le développement de la résistance d'un béton ayant un rapport eau/ciment de 0,53. La plage des températures considérées était comprise entre 4 et 46°C et, deux heures après leur confection, toutes les éprouvettes avaient été mûries à 21 °C. Les éprouvettes avaient été scellées pour empêcher tout mouvement d'humidité. Les résultats d'essais sur cylindres montrent qu'au-delà de 7 jours les résistances à la compression du béton diminuent par suite d'une température plus élevée durant les deux premières heures.

Les essais sur cylindres mûris à l'eau durant les premières 24 heures à 2°C et à 18°C ont montré qu'à 28 jours, les premiers ont une résistance supérieure de 10% à celle des derniers.



**Figure I.28:** Influence de la température des deux premières heures suivant la mise en place sur la résistance du béton [14].

### I.5. Durabilité

La durabilité d'un ouvrage se caractérise par sa capacité à durer dans le temps sans subir de dégradations, tous en conservant son intégrité et en maintenant son niveau de fiabilité. La notion de durabilité d'un ouvrage se traduit par un ensemble de spécifications techniques basées sur des méthodes d'essais directe ou indirecte, sur l'expérience et sur des préconisations de fabrication, et d'entretien avec des frais aussi réduits que possible. La durabilité des bétons dépend de nombreux paramètres dont la qualité de conception, la qualité des matériaux et de l'environnement [54].

### **I.5.1 Principaux mécanismes de dégradation (les pathologies des bétons)**

Les ouvrages en béton, durant leur exploitation, sont exposés à des conditions d'environnement ou de fonctionnement qui peuvent leur infliger certaines dégradations. Etablir un bon diagnostic impose des connaissances particulières du comportement des bétons sous l'influence des agents agressifs auxquels il est exposé, de son comportement mécanique. La détermination des causes de dégradation est un sujet complexe et l'interaction entre les différentes pathologies rend le jugement parfois plus difficile. Le choix des matériaux et les techniques de réparations sont, également, d'une importance décisive pour mener la tâche d'intervention avec succès

Les causes principales de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques, chimiques et mécaniques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les dégradations peuvent provenir également de défauts initiaux dus soit à une conception mal adaptée, soit à une mauvaise mise en œuvre des bétons [55].

#### **I.5.1.1 la corrosion des armatures**

La corrosion des aciers dans le béton armé est une des principales pathologies du génie civil. Principalement observée dans les structures marines et l'industrie chimique, elle est également très présente dans le secteur des routes, ponts et structures de stationnement, en particulier avec l'application des sels de déverglaçage pendant les mois d'hiver, et c'est le mécanisme de dégradation le plus coûteux en terme de réparation, il a un impact important sur les comptes d'exploitation.

Un acier mis au contact d'un béton qui a une forte basicité (pH de l'ordre de 12) et qui n'est pas pollué par des chlorures, se recouvre d'oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits " intermédiaires " qui ne sont pas stables en présence d'oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits " finaux " non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l'enrouillement continu de l'acier.

C'est pourquoi, les dégradations par corrosion des armatures produisent des défauts qui ne deviennent visibles qu'après un certain délai. Les défauts invisibles sont des modifications chimiques et parfois physiques (liés à la microstructure) de l'enrobage de béton. Il s'agit aussi du début d'un éclatement (délamination) de cet enrobage ou de la formation d'une fine couche de rouille sur l'acier. Dans certains cas, la dissolution des armatures se produit, sans aucune trace visible sur le parement [56-57].

#### **I.5.1.2 Gel/dégel**

Il est généralement admis que l'accroissement de volume, de l'ordre de 9 %, accompagnant la transformation de l'eau en glace (le béton contient toujours de l'eau non combinée, une partie

de cette eau gèle dès que la température descend de quelques degrés en dessous de 0 °C) n'est pas la seule cause de la dégradation du béton.

Dans la zone atteinte par le gel, des cristaux de glace se forment dans les plus gros capillaires, créant un déséquilibre thermodynamique qui va déclencher une migration de l'eau des capillaires les plus fins vers les capillaires dans lesquels l'eau est gelée (l'eau dans les capillaires les plus fins restant à l'état liquide). C'est l'accroissement des pressions hydrauliques dans les capillaires, engendré par ces mouvements de l'eau interne non gelée vers les « fronts de congélation », ainsi que les pressions osmotiques créées par les différences de concentrations en sels dissous entre l'eau située à proximité de l'eau gelée et celle non gelée (présente dans les capillaires fins), qui est considéré aujourd'hui comme la cause principale des dégradations. Ces pressions (hydrauliques et osmotiques) peuvent localement fissurer la pâte de ciment, si elles sont supérieures à la résistance à la traction de la pâte. Ce sont les modifications répétées et alternées de température (température positive à température négative) qui après un certain nombre de cycles peuvent dégrader le béton. Les dégradations sont le résultat d'un endommagement progressif. Elles dépendent de la vitesse de descente en température, du nombre de cycles et de la durée du gel [58].

### **I.5.1.3 Alkali –réaction**

En 1935, R.j Holden est le premier qui a observé l'existence des réactions chimiques dans le béton, entre le ciment et certains granulats. Ensuite Karmmer et Carlson ont constaté l'existence de désordres mais c'est l'américain Stanton qui a précisé le premier, en 1940, la nature des réactions causant les perturbations observées : ces réactions produisent entre les alcalins du ciment et certain types de granulats, d'où le nom « Réaction Alcalis-Granulats » (RAG).

Les alcali-réactions sont des réactions chimiques entre certaines formes de silice ou de silicate contenus dans les granulats et les alcalins du béton. Les mécanismes de l'alcali-réactions sont complexes et font toujours l'objet de travaux de recherche. Les principales conséquences de cette réaction consistent en la formation d'un gel expansif, entraînant un gonflement du béton. Ce gonflement engendre à son tour des contraintes internes au sein de la structure. Il en résulte une expansion de la structure, ainsi qu'une création de fissures de différentes formes

Outre le gonflement et la fissuration, l'alcali-réaction a pour conséquence de diminuer les propriétés mécaniques du béton [59].

### **I.5.1.4 Carbonatation « Cancer du béton »**

La carbonatation du béton par le gaz carbonique de l'air (CO<sub>2</sub>) est un phénomène naturel qui n'est pas nocif pour le béton. Au cours de la prise et du durcissement, les ciments se combinent avec l'eau pour former des produits hydratés de caractère basique. Certains de ces produits [L'hydroxyde de potassium KOH, l'hydroxyde de sodium NaOH et la chaux Ca(OH)<sub>2</sub>] restent dissous dans la solution aqueuse interstitielle du béton (dont le pH est compris entre 12 et 13). Le gaz carbonique contenu dans l'air a tendance à se combiner avec

les produits hydratés, en commençant par les bases alcalines dissoutes dans la solution aqueuse interstitielle, en particulier le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , selon une réaction produisant du carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  :



Le milieu basique (pH 12 à 13) se trouve progressivement modifié par la neutralisation de l'alcalinité du ciment pour atteindre un pH de l'ordre de 9, n'assurant plus la protection des armatures et entraînant une dépassivation de l'acier (destruction de la couche de passivation), ce qui développe une réaction d'oxydation à la surface des armatures.

La progression de la carbonatation se fait de l'extérieur de l'ouvrage, en contact avec l'air ambiant, vers l'intérieur. Dans un premier temps, la vitesse de propagation est ralentie par la formation des carbonates qui colmatent partiellement la porosité. Elle diminue donc avec la profondeur atteinte. Dans un second temps, la carbonatation a pour conséquence une neutralisation (chute du pH de la solution interstitielle) du milieu de protection des armatures, qui peuvent alors s'oxyder. La cinétique du processus dépend de la teneur en dioxyde de carbone et de la facilité avec laquelle le gaz carbonique pénètre dans les pores du béton.

Cette progression est fonction de paramètres liés aux caractéristiques du béton (nature et dosage du ciment, dosage en eau, porosité et perméabilité) et au milieu environnant. Plus le béton est compact, le dosage en ciment élevé, le rapport eau/ciment faible et la résistance du béton élevée, plus la progression du front de carbonatation est lente. Tout ce qui conduit à diminuer la porosité du béton retarde l'échéance de dépassivation des armatures.

L'humidité relative de l'air joue, en particulier, un rôle important: la vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité relative de l'ordre de 60 %, pratiquement nulle en atmosphère sèche ou pour des bétons complètement saturés en eau.

La cinétique et la profondeur de carbonatation d'un béton sont donc fonction de sa composition, de sa structure poreuse, de la classe d'exposition et de l'humidité relative dans laquelle est situé l'ouvrage. Elle dépend aussi de la concentration en dioxyde de carbone et de la température de l'atmosphère environnant.

Pour un béton courant, l'épaisseur de la couche carbonatée augmente proportionnellement à la racine carrée du temps.

De nombreuses études ont démontré que la migration du dioxyde de carbone à travers la texture poreuse du béton est significativement réduite lorsque la compacité du béton d'enrobage est augmentée. La porosité totale du béton et la distribution de la taille des pores sont les paramètres déterminants pour la diffusivité du dioxyde de carbone.

L'augmentation de la compacité est obtenue en particulier en réduisant le rapport E/C. Ce rapport conditionne la perméabilité du béton donc l'interconnexion du réseau poreux et par conséquent, la vitesse ainsi que la possibilité de diffusion des gaz et des ions dans le béton.

Une cure prolongée permet d'augmenter la résistance du béton à la pénétration du dioxyde de carbone en améliorant les propriétés de surface du béton.

### **I.5.1.5 Autres attaques chimiques**

#### **I.5.1.5.1 Actions des chlorures**

L'action des chlorures est spécifique à certains environnements dans lesquels peut se trouver le béton comme les ouvrages soumis aux sels de déverglaçage ou situés en site maritime (zone de marnage, surfaces soumises aux embruns). Les ions chlorures peuvent pénétrer par diffusion ou migrer par capillarité à l'intérieur du béton, franchir la zone d'enrobage, atteindre les armatures, et provoquer des corrosions (par mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydoréduction:  $\text{métal} \rightarrow \text{ions métal Mn}^+ + n \text{ électrons}$ ),

D'abord ponctuelle (corrosion par piqûres) puis généralisée à toute la surface de l'acier. La vitesse de pénétration des chlorures dépend aussi de la porosité du béton. Elle décroît lorsque le rapport eau/ciment diminue.

La corrosion s'amorce dès que la teneur en chlorures au niveau des armatures atteint un certain seuil de dépassement. Ce seuil est fonction du pH de la solution interstitielle et de la teneur en oxygène au niveau des armatures; il est de l'ordre de 0,4 à 0,5 % par rapport au poids du ciment. Il est atteint plus rapidement si le béton est carbonaté.

#### **I.5.1.5.2 Attaque acides**

Le béton présente un caractère basique élevé induit par les composés hydratés de la pâte de ciment (la phase interstitielle contenue dans le béton a un pH très élevé). Il peut donc présenter une certaine réactivité vis-à-vis des solutions acides telles que les pluies acides, les eaux naturelles chargées en dioxyde de carbone, les eaux résiduaires, les eaux des industries agroalimentaires ou industrielles contenant des acides organiques, les eaux chargées en acides minéraux, mais aussi les eaux pures.

#### **I.5.1.5.3 Attaque sulfatique**

Après durcissement du béton, il aura formation d'aluminate. Cette dernière peut réagir au contact de l'eau sulfatée, ce qui va former de l'ettringite. L'ettringite est un hydrate contenant des sulfates, et dont les propriétés de gonflement sont connues depuis plus d'un siècle.

Les sources de sulfate sont multiples, on peut citer à titre d'exemple : le sol, les granulats gypseux, les déchets de plâtre, eau souterraine....

Les dégradations qui peuvent apparaître, suite à ces attaques, sont: un phénomène de gonflement (augmentation de contrainte) et des fissurations. Il existe d'autres paramètres pouvant aussi causer la dégradation des ouvrages en béton, on peut citer : le phénomène de

carbonatation, lixiviation, conditions climatiques et variation thermique, ou encore la surcharge des ouvrages

Tous les phénomènes et les mécanismes de dégradations cités précédemment ont des causes précises, car la durabilité d'un ouvrage peut être maintenue, si les paramètres liés à la conception de l'ouvrage et au choix des matériaux sont anticipés et maîtrisés [55, 60].

### **I.5.2 Les indicateurs de durabilité**

Plusieurs travaux de recherche observent que la valeur de la résistance en compression, indicateur traditionnel de la performance des bétons, n'est désormais plus suffisante pour évaluer la durabilité potentielle des bétons et pour sélectionner une formule devant satisfaire des critères relatifs à la durabilité [54].

Les indicateurs de durabilité sont des paramètres essentiels pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du béton et de la structure vis-à-vis du processus de dégradation considéré. Comme un béton d'enrobage fournit, dans un premier temps, une barrière physique (la porosité, l'absorption, la perméabilité et la diffusivité), et dans un deuxième temps, une protection chimique (la réactivité et la solubilité), les indicateurs de durabilité sont destinés à évaluer ces barrières au travers de tests spécifiques. Les indicateurs de durabilité sont deux catégories:

- les indicateurs généraux propres à tous les bétons,
- les indicateurs spécifiques propres à une dégradation particulière.

#### **I.5.2.1 Les indicateurs de durabilité généraux**

Les indicateurs de durabilité généraux permettent d'évaluer la durabilité de tout type de bétons. En particulier, deux indicateurs semblent pertinents compte-tenu de notre problématique et caractérisant la barrière physique: « il s'agit de la porosité et la perméabilité ». En effet, nous allons les détailler comme ci-dessous:

##### **I.5.2.1.1 La porosité**

La porosité est le premier facteur qui apparaît comme fondamental dans la caractérisation des bétons. Il est important de limiter la porosité car elle affecte la durabilité des ouvrages et peut conduire à une perte de capacité structurale en influençant la résistance en compression et d'autres propriétés du béton.

Tout milieu poreux est constitué de deux domaines distincts : la charpente du milieu (bordure solide) et son complément qui constitue le volume poreux. La porosité ( $N$ ) d'un matériau poreux est la fraction de volume total occupée par les vides. Si  $V_t$  est le volume total de l'échantillon,  $V_p$  le volume poreux ou le volume des vides et  $V_r$  le volume réel de la phase solide, on a alors (1.4) :

$$N \% = \frac{V_P}{V_T} 100 = \frac{V_T - V_S}{V_T} 100 \dots\dots\dots (I.4)$$

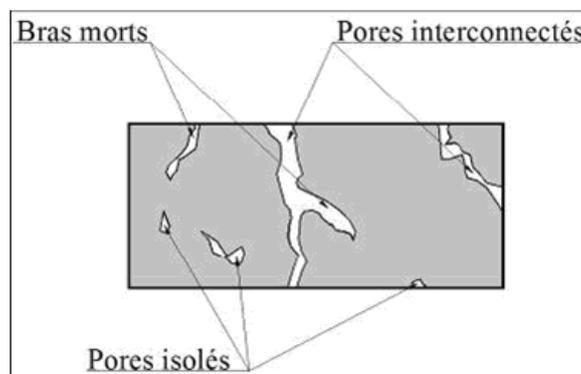
➤ Géométrie et positionnement des pores

Ces vides se distinguent par leur forme : lorsque les formes sont convexes, globuleuses, ce sont des pores ; lorsqu'elles sont grandes, plates et étendues, ce sont des fissures. Lorsque les vides communiquent entre eux, il s'agit d'une porosité ouverte (ou libre). Lorsque les vides sont isolés, c'est une porosité occluse ou fermée.

La figure I.29 présente les pores suivant leur position par rapport au milieu extérieur :

- les pores interconnectés ou pores ouverts qui communiquent avec l'extérieur par deux extrémités (au moins).
- les pores isolés qui ne communiquent pas avec l'extérieur.
- les bras morts sont interconnectés avec le milieu extérieur par une seule de leurs extrémités.

Les pores interconnectés permettent le transport de matières dans le matériau, contrairement aux pores aveugles ou aux pores isolés.

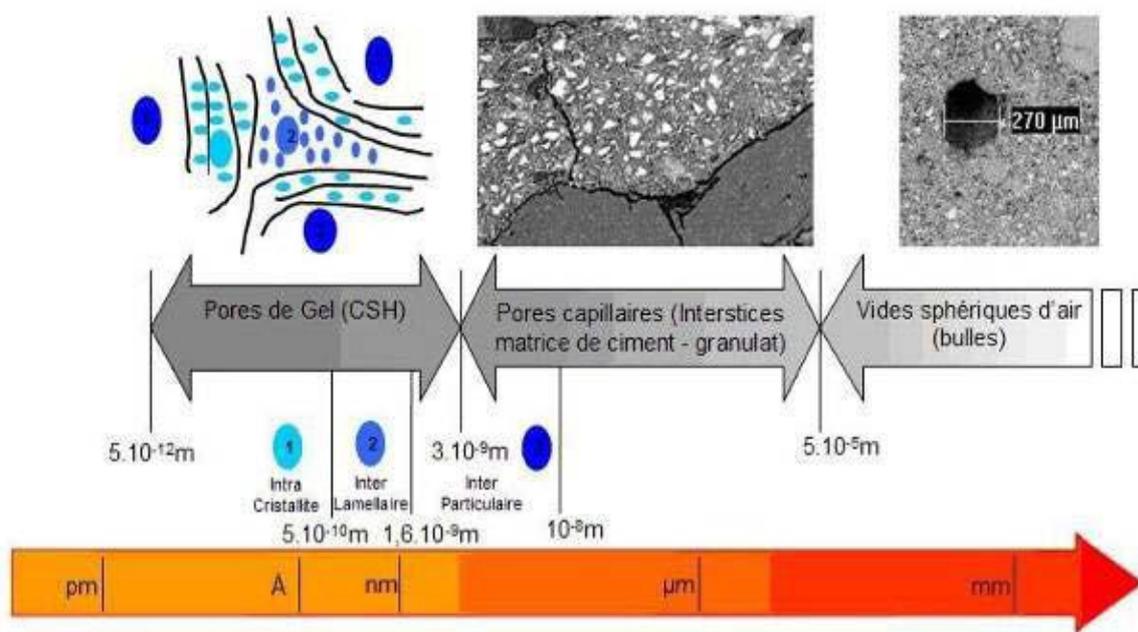


**Figure I.29:** Les différents pores d'un béton, positionnement selon le milieu extérieur.

La porosité d'un béton apparaît comme un paramètre extrêmement important puisqu'il conditionne la rugosité de surface ainsi que la quantité d'eau potentiellement présente dans le matériau. Un matériau présentant une porosité importante offre également une surface de réaction importante entre le matériau et les substances chimiques agressives avec lesquelles il est en contact. Ceci entraîne une vitesse de dégradation potentiellement plus élevée.

### I.5.2.1.1.1 Tailles des porosités

Le réseau poreux des matériaux cimentaires tels que les bétons, les mortiers ou encore les pâtes de ciment recouvre une large gamme d'échelles (du picomètre au centimètre). La figure I.30 présente les différents types de porosités que l'on rencontre dans les matériaux cimentaires en fonction de leur taille et de leur géométrie.



**Figure I.30:** Echelle des porosités des matériaux cimentaires [61].

La porosité des matériaux cimentaires est constituée de :

- vides d'air occlus, généralement de forme sphérique et de dimension supérieure à 50 micromètres. Ces vides sont générés par le piégeage dans le matériau à l'état frais de bulles d'air qui ne parviennent pas à s'échapper malgré le serrage (vibrations, chocs) de la pâte.
- pores capillaires, ils peuvent être modélisés sous la forme de tubes tortueux dont le diamètre varie entre 1 micromètres et 50 micromètres. Ces porosités sont liées à l'hydratation des grains de ciment ainsi qu'à la présence de granulats.
- pores de gel, ces pores sont liés à la structure lamellaire même des CSH (silicates de calcium hydratés) et de dimension de l'ordre du nanomètre [62].

Ces porosités sont liées à la structure propre du matériau (structure et arrangement des cristaux) mais également à sa mise en œuvre. Le rapport E/C est un facteur de grande importance car, si l'augmentation de la quantité d'eau dans les matériaux cimentaires à l'état frais permet d'améliorer l'ouvrabilité du matériau, elle augmente sa porosité [61]. En effet, l'eau présente en excès, qui ne sert donc pas aux différents processus d'hydratation du ciment, s'évapore lors du séchage du matériau laissant les emplacements qu'elle occupait vides [14].

### I.5.2.1.1.2 Connectivité

La connectivité (C) est un paramètre de la topologie de la structure poreuse qui caractérise le degré avec lequel une structure poreuse est connectée. Elle correspond au plus grand nombre de branches du réseau poreux pouvant être coupées sans déconnecter de nœuds du reste du réseau. Pour une meilleure compréhension du modèle associé voir, par exemple. Dans notre cas, nous retenons la relation :

$$C = b - n + 1 \dots\dots\dots (I.5)$$

où b est le nombre de branches et n le nombre de nœuds. Remarquons qu'un pore isolé, mais qui se connecte par exemple par microfissuration aux pores interconnectés, peut désormais participer aux écoulements à travers le matériau. On a alors une connectivité qui augmente par fissuration.

### I.5.2.1.1.3 Tortuosité

La tortuosité ( $\tau$ ), introduite dans le modèle géométrique de la perméabilité caractérise le chemin d'écoulement d'un fluide à travers le réseau poreux par :

$$\tau = \left(\frac{Le}{L}\right)^2 \dots\dots\dots (I.6)$$

où  $Le$  est la longueur réelle du parcours d'un fluide et  $L$  est la longueur projetée du parcours d'un fluide en ligne droite [64].

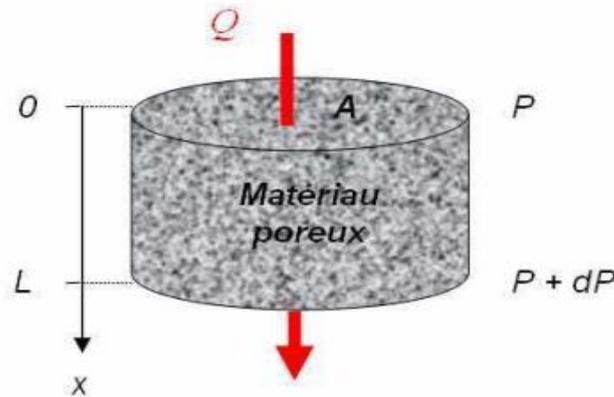
### I.5.2.1.2 La perméabilité

La perméabilité est un indicateur de durabilité général majeur qui évalue la capacité du matériau vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs [65]. La perméabilité est l'aptitude d'un matériau à se laisser traverser par un fluide liquide ou gazeux sous l'effet d'un gradient de pression motrice. Elle va informer sur l'interconnectivité et la tortuosité du réseau poreux.

#### I.5.2.1.2.1 Principe de la perméabilité au gaz : concept de Darcy

Poiseuille est à l'origine du concept de la perméabilité en prenant comme hypothèses que le fluide percolant est incompressible, que l'écoulement est laminaire et permanent et que les pressions capillaires sont négligeables. Ce concept relie donc l'écoulement d'un fluide avec un débit volumique et une vitesse d'écoulement dans un tube, ainsi qu'un gradient de pression. Ce raisonnement se fait à l'échelle du pore. En se basant sur les travaux de Hagen et Poiseuille, Darcy [66] introduit pour un milieu poreux un coefficient de perméabilité  $k$  qui relie la vitesse du fluide par le biais du débit avec un gradient hydraulique selon l'équation (1.7) (figure I.31).

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots (I.7)$$



**Figure I.31:** Concept de la perméabilité d'un milieu poreux selon [66]

En considérant cette relation, on détermine la perméabilité apparente  $k_a$ . Pour cela, on intègre aux conditions aux limites avec pour  $dx$ , de 0 à  $H$  (épaisseur de l'échantillon) et pour  $dp$  de la pression d'entrée  $P_e$  à la pression de sortie  $P_s$ . On obtient donc  $k_a$  à partir de l'équation (I.8) :

$$k_a = \frac{Q}{A} \frac{2 \eta H P_s}{(P_e^2 - P_s^2)} \quad (\text{m}^2) \quad \dots \quad \text{(I.8)}$$

Il n'en demeure pas moins que cette perméabilité  $k_a$  est une perméabilité apparente car elle va dépendre de :

- l'accessibilité au pore,
- l'état hydrique du matériau,
- la pression d'essai.

#### 1.5.2.1.2.2 Limites de la loi de Darcy

Pour déterminer le coefficient de perméabilité  $k_a$ , la loi de Darcy présente des limites dans son application. Hors de son domaine d'usage, les écoulements par perméation n'obéissent plus à cette loi. Des écarts par rapport à la relation énoncée précédemment apparaissent. Ces variations sont dues :

- aux vitesses de percolation élevées créant des phénomènes de turbulence,
- aux effets ioniques dus à la chimie du fluide pouvant réagir avec le milieu poreux,
- aux fluides non newtoniens car cette loi n'est applicable qu'aux fluides newtoniens,
- aux effets moléculaires pour des débits très faibles et pour des tailles de pores petites.

**1.5.2.1.2.3 Perméabilité et la pression d'essai : le concept de Klinkenberg**

On a vu précédemment que la valeur de la perméabilité apparente  $k_a$  dépendait de la pression d'essai, du fluide percolant et du taux de saturation de l'échantillon poreux. Klinkenberg [67] a remarqué des écarts entre la perméabilité au gaz et à l'eau quand le milieu poreux est plus perméable. Or, la perméabilité au gaz pour un état sec est différente de la perméabilité à l'eau à l'état saturé (en eau). Expérimentalement, on remarque que  $k_{gaz} > k_{eau}$  dans les conditions optimales. En effet, la taille des pores va influencer sur l'écoulement du fluide percolant. Il va être différent selon qu'il se développe dans les pores des hydrates ou dans les pores capillaires. On introduit donc les notions d'écoulement laminaire et d'écoulement moléculaire dont les débits sont définis respectivement par les équations (I-10 et I-11).

$$q_{laminaire} = \alpha \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots (I.9)$$

$$q_{moléculaire} = \beta \frac{1}{P_m} \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots (I.10)$$

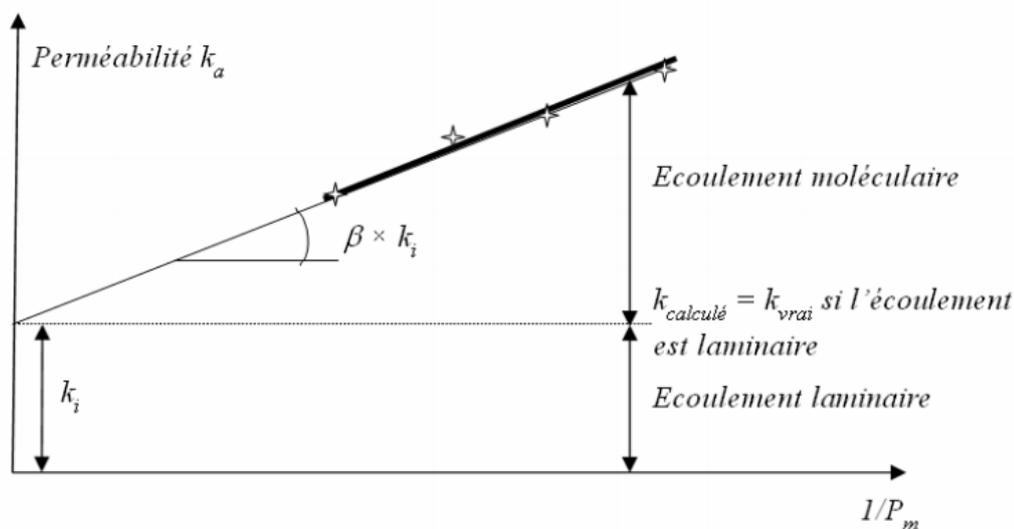
Le débit total de gaz résultant de son écoulement au travers d'un matériau poreux est représenté par l'équation (I.11).

$$q_{gaz} = \sum q_{laminaire} + \sum q_{moléculaire} = \left( \sum \alpha + \sum \frac{\beta}{P_m} \right) \frac{dp}{dx} \dots\dots\dots (I.11)$$

On distingue, lors d'un écoulement d'un fluide compressible à travers un échantillon poreux, une contribution des écoulements moléculaire et laminaire. Dans ces contributions non visqueuses, on trouve d'une part les écoulements de glissement qui sont dus à la discontinuité moléculaire structurelle des gaz. Cette discontinuité agit sur les molécules situées à proximité des parois. Il existe aussi l'écoulement moléculaire dû au déplacement des molécules par chocs les unes contre les autres. Ce phénomène se produit quand la taille des pores devient beaucoup plus petite que le libre parcours moyen des molécules de gaz. Pour conclure, on peut dire que la perméabilité d'un matériau n'est pas intrinsèque au matériau lui même mais elle va dépendre du fluide percolant. Il est donc nécessaire de s'affranchir des artefacts expérimentaux afin que la perméabilité soit considérée comme une caractéristique intrinsèque du matériau. Au travers de l'équation (I.12), Klinkenberg [67] propose une approche qui introduit  $k_i$  le coefficient de perméabilité intrinsèque ou absolue.

$$k_a = k_i \left( 1 + \frac{\beta}{P_m} \right) \dots\dots\dots (I.12)$$

Cette relation permet de séparer la perméabilité absolue  $k_i$  de la perméabilité apparente  $k_a$ . En effet, ce terme  $k_a$  englobe les effets combinés des contributions visqueuses (écoulement laminaire) et non visqueuses (écoulement moléculaire) (figure I.32).



**Figure I.32:** Représentation graphique du concept de Klinkenberg.

Ainsi, Klinkenberg détermine une perméabilité qui caractérise le matériau poreux sans tenir compte de la nature du fluide. Si l'on établit expérimentalement la relation entre  $k_a$  et  $1/P_m$ , les valeurs de  $k$  et de  $\beta$  qui sont des caractéristiques du milieu poreux peuvent être déduites. En traçant la courbe  $(k_a - 1/P_m)$  avec les valeurs mesurées durant l'essai, la valeur de  $k$  est l'ordonnée à l'origine et  $\beta \times k_i$  est la pente.

**Remarque.**

La valeur intrinsèque de la perméabilité notée  $k_i$ , est la perméabilité que l'on détermine si on ne tient pas compte de contribution moléculaire au niveau de l'écoulement [68].

**1.5.2.1.2.4 Ecart entre la perméabilité à l'eau et la perméabilité au gaz des bétons**

Dans les conditions d'application de la loi de Darcy, la perméabilité intrinsèque est théoriquement indépendante de la nature de fluide. C'est effectivement ce qui a été constaté sur certains matériaux insensibles à la présence d'eau par exemple Klinkenberg [67]. Par contre, 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 le liquide.

Dans la suite les hypothèses qui peuvent expliquer une telle différence de résultats entre les mesures avec le gaz ou avec l'eau sont présentées.

**1.5.2.1.2.5 Sous-évaluation de la perméabilité à l'eau**

Lors de mesure de perméabilité à l'eau, deux raisons peuvent conduire à une sous-évaluation de la perméabilité du béton testé :

- La réactivité du fluide vis-à-vis du milieu poreux

- Les difficultés de mesure de débits très faible, et/ou l'application de gradients de pressions importantes.

Pratiquement la perméabilité à l'eau semble dans bien des cas plus représentatif du matériau en service. Cependant, le principal inconvénient de la perméabilité à l'eau réside dans le fait que l'eau n'est pas totalement inerte vis-à-vis de la pâte de ciment. Les composés hydratés de la pâte de ciment forment un milieu basique prononcé. La plus grande partie des milieux fluides présentent ainsi un comportement acide vis-à-vis du béton. Les milieux acides agressifs pour le béton débutent par les eaux pures, s'étendent aux eaux douces peu ou beaucoup chargées en dioxyde de carbone, puis aux pluies acides, pour s'achever aux acides minéraux et organiques. Les interactions entre l'eau et la matrice cimentaire se traduisent entre autres par un phénomène de dissolution de la portlandite et par un phénomène de précipitation de carbonate de calcium, très peu soluble, qui accroît momentanément la compacité du béton en diminuant la section des pores.

La réduction du flux est aussi induite par des phénomènes mineurs tel que :

- Gonflement des hydrates (C-S-H)
- Obturation des pores par des particules en suspension

Ces types de phénomènes produisent 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.

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. Edvarsen [69] soutient que pour des échantillons fissurés, la diminution du débit d'eau dans le temps sous un gradient de pression constant est surtout sensible au début relatif uniquement à l'eau liquide pour une percolation à long terme.

#### 1.5.2.1.2.6 Surévaluation de la perméabilité au gaz

On trouve parfois dans la littérature l'erreur qui consiste à confondre la perméabilité intrinsèque  $k_v$  et la perméabilité apparente  $k_v (1+b^*/p_{gz})$  qui prend en compte l'effet de glissement du gaz sur la paroi. Bamforth [70] montre que les écoulements par glissement qui s'opèrent dans un béton pour des pressions moyennes d'injection inférieures à 5 MPa peuvent alors conduire à des écarts importants. Mais l'une des raisons les plus importants qui expliquent la différence de mesure de perméabilité intrinsèque au gaz et liquide, réside dans le fait qu'un préconditionnement des éprouvettes est nécessaire avant la mesure de perméabilité. Il est donc nécessaire de faire subir aux échantillons un séchage préalable. 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.

En résumé, la microstructure poreuse du matériau béton est différente lors d'une mesure de perméabilité à l'eau et lors d'une mesure de perméabilité au gaz. C'est sans doute là l'explication principale de différence de ces mesures [77].

### I.5.2.1.3 Absorption d'eau par capillarité

Le transfert de liquides dans un matériau poreux, dû à des tensions de surface dans les capillaires, est appelé l'absorption d'eau. Ce mécanisme de transfert n'est pas seulement lié à la structure poreuse mais aussi à l'humidité relative du béton. L'absorption d'eau à l'intérieur du béton sec est connue pour dépendre de deux paramètres majeurs à savoir la porosité effective du béton et la vitesse d'absorption par remontée capillaire (absorptivité). Etant donné que le remplissage des capillaires et des vides a lieu en même temps que la montée de l'eau durant l'absorption, seule une combinaison de phénomènes est mesurable et donne une idée de l'absorption d'eau d'un béton.

En pratique, l'absorption se mesure en faisant sécher une éprouvette de béton à masse constante, puis en l'immergeant dans l'eau et en mesurant l'augmentation de sa masse au cours du temps. Une autre méthode pour évaluer l'absorption d'eau consiste à mesurer le taux d'absorption d'eau par succion capillaire à l'intérieur d'une éprouvette de béton. Cet essai permet d'exprimer la vitesse d'absorption par remontée capillaire. Le mécanisme de l'absorption d'eau est décrit par l'équation I.13.

$$M(t) = S t^{1/2} \dots\dots\dots \text{(I.13)}$$

où  $M(t)$  ( $\text{kg/m}^2$ ) : masse d'eau absorbée par unité de surface

$S$  ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}^{-1/2}$ ) : la sorptivité       $t$  (s) : temps

L'absorptivité est influencée en premier lieu par le rapport E/C. D'autre part, plus le taux d'humidité du béton est élevé, plus la valeur mesurée d'absorptivité est faible même si dans ce cas d'étude l'éprouvette est pré-séchée. L'évaluation du comportement des bétons face à ce mécanisme de transfert permet de compléter et d'approfondir l'analyse des propriétés caractéristiques de leur durabilité [68].

### I.5.2.1.4 Le coefficient de diffusion des Cl

La diffusion désigne le processus de transport d'un constituant liquide ou gazeux dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire sous un gradient de concentration. On observe deux formes de transport par diffusion dans les bétons :

- L'une en phase liquide : cela concerne le transport d'espèces en solution dans la phase aqueuse interstitielle des pores du matériau (par exemple, les chlorures),

- L'autre en phase gazeuse : il s'agit du transport de gaz par diffusion dans l'air contenu dans la porosité et les fissures du matériau. Cela concerne, en particulier, le dioxyde de carbone.

On définit le coefficient de diffusion effectif d'une espèce ionique (les chlorures par exemple) diffusant dans la solution interstitielle saturant un matériau poreux par la première loi de Fick (équation I.14) :

$$\vec{J} = -D \overrightarrow{\text{grad}} c \dots \dots \dots \text{(I.14)}$$

où  $J$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) : flux massique de fluide diffusant par unité de temps et de surface,

$D$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) : diffusivité,

$c$  ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) : concentration en fluide diffusant.

À partir de cette dernière équation, on calcule le coefficient de diffusion  $D_a$  en tenant compte des interactions (des effets de la variation de section des pores). On exprime la diffusion apparente  $D_a$  ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) à partir de l'équation 1.15.

$$D_a = D T \frac{P}{\tau} \dots \dots \dots \text{(I.15)}$$

où  $P$  (%) : la porosité,

$T$  : coefficient de la constrictivité,

$\tau$  coefficient de la tortuosité.

Mesurer un coefficient de diffusion sur un matériau cimentaire de volume représentatif est très long (8 à 9 semaines sont nécessaires pour obtenir des résultats dans le cas d'un mortier de 1 cm d'épaisseur et de rapport E/C de 0,5).

### 1.5.3 Les indicateurs de durabilité spécifiques

Pour avoir une bonne estimation de la durabilité des ouvrages, il peut s'avérer nécessaire de compléter le panel d'indicateurs généraux par des indicateurs spécifiques [AFGC, 2004]. Selon la classe d'exposition des ouvrages (la pénétration de chlorures XS, la carbonatation des bétons XC, les attaques sulfatique XA), un indicateur de durabilité spécifique est défini. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un essai de dégradation accélérée. Par exemple, pour le cas de la prévention des dégradations dues à la carbonatation, un essai de carbonatation accélérée permet de mesurer une profondeur de carbonatation [78].

## 1.6 Conclusion

Nous avons fait une revue générale sur le matériau béton, de ses constituants, de ses propriétés à l'état frais jusqu'à ses propriétés à l'état durci, les différents pathologies, la durabilité et leur principaux indicateurs

Dans cette thèse nous nous intéressons d'une part, à deux principaux indicateurs de durabilités de caractéristique physique qui sont la porosité et la perméabilité et aux paramètres qui les affectent. La méthode de contrôle non destructif du béton par les ondes ultrasonores fait l'objet du chapitre suivant.

---

## **CHAPITRE II**

# **Notions sur les ondes ultrasonores et l'atténuation**

---

### II.1. Introduction

Le béton est un matériau dont les propriétés dépendent de sa formulation, de ses conditions de mise en œuvre, qui évoluent dans le temps en fonction de son environnement et de différents types de dégradations qu'il est susceptible de subir. La connaissance et le suivi de ses différentes propriétés physiques sont donc primordiaux pour la maintenance des ouvrages de génie civil.

Les techniques du contrôle non destructif (CND), sont mises au point pour l'auscultation du béton, évaluer et détecter en temps réel soit des défauts évolutifs ainsi que pour l'évaluation des propriétés physiques de l'ouvrage sans l'endommager, d'où l'intérêt de ces techniques.

La propagation des ondes ultrasonores est utilisée comme technique non destructive de contrôle des matériaux et de suivi de leur endommagement. Ces ondes permettent de déterminer des caractéristiques mécaniques telles que les modules d'élasticité et le coefficient de poisson, ou encore le taux de porosité du milieu ausculté et d'en apprécier l'homogénéité (en détectant des vides, délaminages et microfissurations), de caractériser un béton mal-formulé, ou ayant subi une modification structurelle (cas des bétons gelés ou incendiés).

Dans ce chapitre, sont exposés les principes physiques de propagation des ondes ultrasonores sur lesquelles sont fondées ces méthodes non destructives.

### II.2. Mesures utilisant la propagation d'ondes

Les méthodes utilisant la propagation d'ondes et l'interaction de ces ondes avec le béton sont parmi les méthodes ayant le plus grand potentiel pour l'évaluation non destructive du béton. En effet, les propriétés de la propagation des ondes sont directement liées aux propriétés du matériau dans lequel elles se propagent. Ces ondes peuvent être de types électromagnétiques ou mécaniques et sont sensibles à des propriétés différentes du béton. Elles peuvent être utilisées pour obtenir des informations à différentes échelles (millimétrique, centimétrique, ou de l'ordre de la dizaine de centimètres) en fonction de la longueur d'onde utilisée.

Les méthodes utilisant des ondes mécaniques se basent sur la propagation d'ultrasons dans le béton. Ces ondes sont sensibles aux propriétés mécaniques telles que les modules d'élasticité et le coefficient de Poisson, ou encore le taux de porosité. Elles reposent sur l'interprétation, soit en temps, soit en fréquence, de l'onde enregistrée en fonction de l'onde émise.

Les méthodes les plus couramment employées à ce jour sont l'impact écho (IE), l'auscultation sonore (pulse velocity) et l'émission acoustique (EA). Les ondes acoustiques peuvent être employées pour détecter des fissures, des vides, ou mesurer des épaisseurs. Les caractéristiques mécaniques du béton peuvent également être évaluées après étalonnage [79-80].

### II.3. Eléments théoriques de la propagation des ondes acoustiques

#### II.3.1. Principes théoriques

Le terme “onde” représente la propagation des perturbations d'un milieu par rapport à sa position d'équilibre. Dans le cas des ondes mécaniques, la perturbation est un déplacement  $u$  d'une particule du milieu. Dans un milieu élastique homogène, en l'absence de forces extérieures, on a la relation fondamentale de la dynamique :

$$\nabla \cdot \sigma = \rho u'' \dots\dots\dots (\text{II.1})$$

Où  $\sigma$  représente le tenseur des contraintes et  $\rho$  la masse volumique.

Les notations  $u'$  et  $u''$  désigneront respectivement les dérivées temporelles simples et doubles du vecteur  $u$ .

En appliquant la loi de Hooke en milieu isotrope, élastique et homogène, qui donne une relation contrainte-déformation entre  $\rho$  et  $u$  en fonction des paramètres de Lamé  $\lambda$  et  $\mu$ , on obtient l'équation de propagation (II.2):

$$(\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot u) - \mu\nabla \times (\nabla \times u) = \rho u'' \dots\dots\dots (\text{II.2})$$

#### II.3.2. Longueur d'onde

La longueur d'onde  $\lambda$  est la distance minimale, dans la direction de propagation d'une onde périodique, entre deux points où les vibrations sont en concordance de phase. Elle est égale au rapport de la vitesse de propagation  $V$  divisée par la fréquence  $f$ :

$$\lambda = \frac{V}{f} \dots\dots\dots (\text{II.3})$$

Le nombre d'onde est aussi souvent utilisé, il est égal à :

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} \dots\dots\dots (\text{II.4})$$

#### II.3.3. Impédance acoustique

Par définition, l'impédance acoustique  $Z$  traduit le comportement d'un milieu matériel vis-à-vis des ultrasons. Elle dépend de la masse volumique et de la compressibilité du milieu, c'est à-dire de son aptitude à reprendre sa forme originale après déformation. Elle s'écrit :

$$Z = \frac{\text{Pression}}{\text{Vitesse}} = \rho \cdot V \dots\dots\dots (\text{II.5})$$

Avec  $\rho$  : la masse volumique et  $V$  la célérité de l'onde ultrasonore.

Elle est d'autant plus grande que la densité est importante et que la compressibilité est faible. Elle traduit la plus ou moins grande aptitude d'un milieu donné à la pénétration des ultrasons

et s'exprime en kg/m<sup>2</sup>/s. Elle est faible pour l'air ( $Z \approx 0,0004 \cdot 10^6$  kg/m<sup>2</sup>/s) et élevée pour les milieux durs ( $Z \approx 8,3 \cdot 10^6$  kg/m<sup>2</sup>/s dans le béton).

### II.3.4. La pression et l'intensité

La pression acoustique varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore. L'énergie délivrée dans le milieu dépend de ces variations de pression qui soumettent les particules du milieu des mouvements vibratoires.

On appelle intensité ultrasonore l'énergie qui traverse perpendiculairement une unité de surface pendant une unité de temps. Elle est reliée à la pression acoustique par la formule suivante :

$$I = \frac{P^2}{2 \rho V} \dots\dots\dots (II.6)$$

Où : - P est appelée la pression d'onde acoustique exprimée en kg.m-1.s<sup>-2</sup>

- I est l'intensité ultrasonore en W.m<sup>-2</sup> [81].

## II.4 Différents types d'ondes ultrasonores

Les modes principaux utilisés en contrôle industriel concernent les ondes longitudinales appelées ondes de compression ou ondes de dilatation dans la théorie de l'élasticité, et les ondes transversales appelées également ondes de cisaillement, et les ondes de surfaces [82].

### II.4.1 Ondes longitudinales

Les ondes longitudinales sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration (direction du déplacement des particules ou encore polarisation de l'onde) est la même que celle de la propagation. Ces ondes sont les plus rapides et leur vitesse de propagation  $V_L$  est liée aux caractéristiques du matériau par exemple module de Young et coefficient de Poisson, par la relation :

$$V_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots\dots\dots (II.7)$$

avec E (Pa) module de Young,

$\nu$  (sans dimension) coefficient de Poisson,  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) masse volumique.

Le champ de déplacement pour une onde longitudinale peut être décrit par [83]:

$$U_1 = U_1(x, t) \quad , \quad U_2 = 0 \quad , \quad U_3 = 0$$

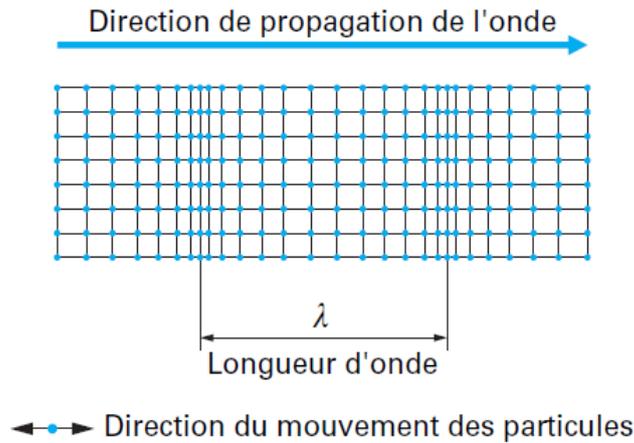


Figure II.1: Ondes ultrasonores longitudinales [84].

**II.4.2 Ondes transversales (cisaillement)**

Les ondes transversales se propagent dans une direction perpendiculaire à celle de la vibration. Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz. Ces ondes sont plus lentes que les ondes  $V_L$ , et leur vitesse de propagation  $V_T$  est liée aux caractéristiques du matériau par la relation [82]:

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2 \rho (1+\nu)}} \dots\dots\dots (II.8)$$

Le champ de déplacement pour une onde transversale (cisaillement) peut être décrit par:

$$U_1 = 0 \quad , \quad U_2 = 0 \quad , \quad U_3 = U_3(x, t)$$

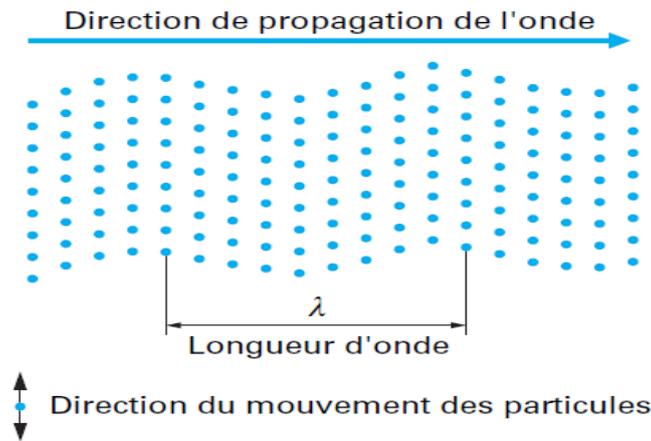
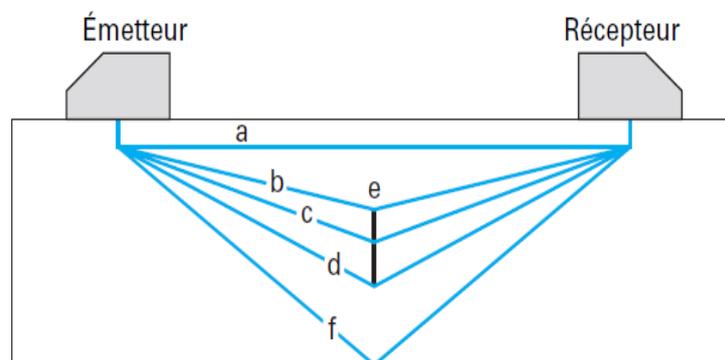


Figure II.2: Ondes ultrasonore transversales (cisaillement) [84].

### II.4.3 Ondes de surfaces

Les ondes de surface sont de plus en plus utilisées pour la caractérisation du béton car elles sont d'une génération relativement aisée et permettent de remonter à une information sur les caractéristiques mécaniques du matériau en profondeur à partir d'un dispositif expérimental posé en surface (Figure II.3). Les ondes de surface présentent les avantages suivants :

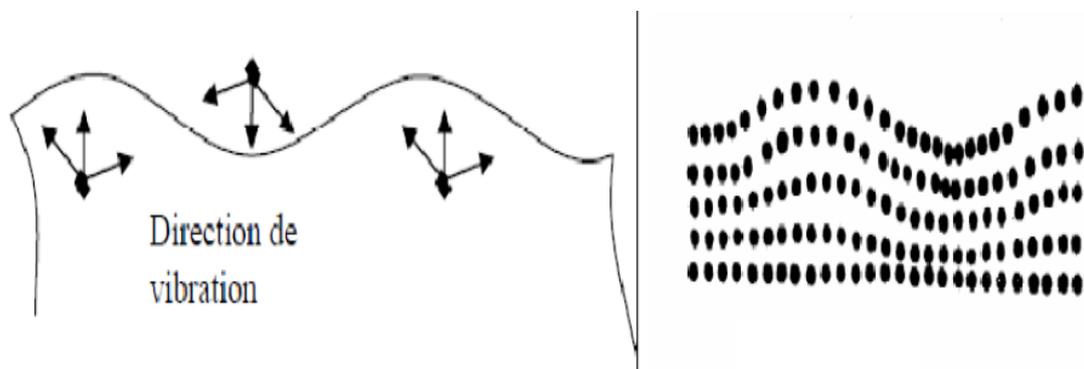
- La mesure est effectuée par une seule face de la structure ;
- Parmi les différents types d'ondes, les ondes de surface sont les plus sensibles aux modifications des propriétés mécaniques et physique du béton ;
- Il est possible de considérer la variation de la vitesse en fonction de la profondeur.



**Figure II.3:** Dispositif expérimental pour la mesure des ondes de surface.

Les ondes de surface sont moins rapides que les ondes de volume mais leur amplitude à la surface du béton est plus forte. Elles sont guidées par la surface du milieu et sont de plusieurs types [81].

Leur vitesse est une fonction complexe de la densité et des vitesses des ondes de volume



**Figure II.4:** Direction de propagation d'une onde de surface.

La relation de Rayleigh donne l'expression de la vitesse pour ce type d'ondes [85] :

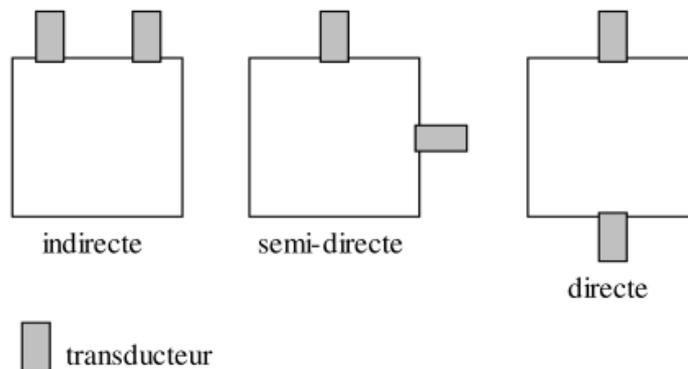
$$V_R = \sqrt{\frac{E (0.87 + 1.12\nu)}{\rho (1-\nu) \sqrt{2 (1+\nu)}}} \dots\dots\dots \text{(II.9)}$$

$V_R$  est toujours plus faible que la vitesse des ondes  $V_T$  et nous avons donc:

$$V_R \approx 0.9 V_T \dots\dots\dots \text{(II.10)}$$

**II.5 Modes d'acquisitions**

Les capteurs peuvent être placés suivant différentes positions par rapport aux matériaux testés. Chaque position, appelée aussi mode, favorise la mesure d'un ou plusieurs types d'ondes (Figure II.5). Le mode d'acquisition indirecte est idéal pour la mesure d'ondes de surface. Le mode d'acquisition semi-directe a des applications intéressantes pour la mesure d'ondes de cisaillement. Le mode d'acquisition directe est surtout utilisé pour mesurer les ondes de compression. Le mode échographie est idéal pour la mesure d'ondes rétrodiffusées. Il est à noter qu'en mode échographie, l'émetteur et le récepteur correspondent à un même capteur [86].



**Figure II.5:** Mode d'acquisition.

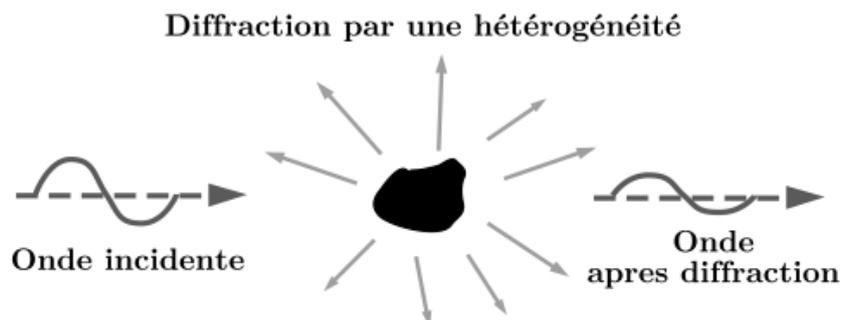
**II.6 Propagation et diffraction des ondes en milieu hétérogène**

La caractérisation non destructive des milieux hétérogènes joue un rôle primordial dans la pérennisation des structures du génie civil. L'estimation de leur potentiel de vie restant, permettrait d'améliorer la qualité et la sécurité et de prolonger leur conformité.

Comme toutes les techniques de contrôle non destructif, il est nécessaire de relier les grandeurs observables, la vitesse et l'atténuation des ondes ultrasonores, aux évolutions du matériau [87-88].

Dans les milieux hétérogènes, la diffraction de l'onde par les hétérogénéités peut également être la cause de la diminution de l'amplitude du champ de déplacement observé avec la distance de propagation.

Lorsqu'une onde interagit avec une hétérogénéité du matériau, elle subit de la diffraction. Une partie de son énergie est déviée et redistribuée dans tout l'espace (Figure II.6). L'onde qui se propage dans la même direction que l'onde incidente après diffraction par l'hétérogénéité a donc une amplitude plus faible. Cet effet de diffraction est plus ou moins marqué suivant la fréquence de l'onde. Il est maximal lorsque la longueur d'onde  $\lambda$  devient comparable à la dimension caractéristique de l'hétérogénéité.



**Figure II.6:** Diffraction d'une onde par hétérogénéité.

Dans le cas du béton, les hétérogénéités peuvent être la porosité de la pâte de ciment, ou les inclusions comme le sable et les granulats. Ces hétérogénéités sont très nombreuses, de natures différentes et de dimensions différentes. Elles influent sur la propagation à différentes échelles, la diffraction est alors multiple (figure II.7).



**Figure II.7:** Diffraction multiple des ondes par l'hétérogénéité.

Les ondes diffractées par les hétérogénéités subissent à leur tour d'autres événements de diffraction et peuvent ainsi parcourir une grande distance à l'intérieur du matériau, le long d'un chemin tortueux, et éventuellement parvenir au point d'observation bien plus tard que l'onde ayant parcouru un trajet direct [80].

## II.7 Emission et réception de l'onde ultrasonore

L'intensité d'une onde acoustique qui se propage dans les différents milieux s'atténue le long de son parcours. Plusieurs facteurs contribuent à cette atténuation telle que l'absorption, la réfraction et la diffusion. L'émission d'impulsions ultrasoniques dans un solide produit deux effets: un effet thermique qui dépend de la puissance acoustique de l'onde et qui engendre une propagation de la chaleur dans le milieu et un effet mécanique qui est la transmission, la réflexion et la dispersion.

### II.7.1 Description du faisceau ultrasonore émis

La théorie de la diffraction montre qu'un faisceau ultrasonore émis par une source plane, circulaire de rayon  $r$  répondant à la condition  $r > \lambda$ , ( $r$  est le rayon de la source,  $\lambda$  est la longueur d'onde) comprend deux parties, une zone initiale cylindrique et une zone conique où le faisceau diverge que l'on nomme respectivement la zone de Fresnel et la zone de Fraunhofer.

#### II.7.1.1 Zone initiale: zone de Fresnel

C'est le champ initial ou zone de Fresnel qui est définie comme une source circulaire. Toute l'énergie est concentrée dans une zone cylindrique dont le diamètre est égal à celui de la source sonore. Le faisceau sonore est caractérisé par la relation suivante figure (II.8) :

$$d = D_s$$

$$l = \frac{D_s^2}{4\lambda} \quad \text{Valable lorsque } D_s > \lambda \dots\dots\dots (II.11)$$

où:

- $d$  est le diamètre de la zone en m;
- $l$  est la longueur de la zone en m;
- $D_s$  est le diamètre de la source en m;
- $\lambda$  est la longueur de l'onde ultrasonore en m.

L'intensité sur l'axe de propagation dans ce cas passe par une succession de maxima et de minima dont les abscisses sont données par :

$$x_{(max)} = \frac{r^2}{(2k+1)\lambda} \quad k = 0,1,2 \dots$$

$$x_{(min)} = \frac{r^2}{2k \lambda} \quad k = 1,2 \dots$$

Pour  $k = 0$ , on obtient la position du dernier maximum  $x(M) = r^2/\lambda$  qui représente la limite entre le champ initial et la zone distale, tel qu'illustrée à la figure II.9.

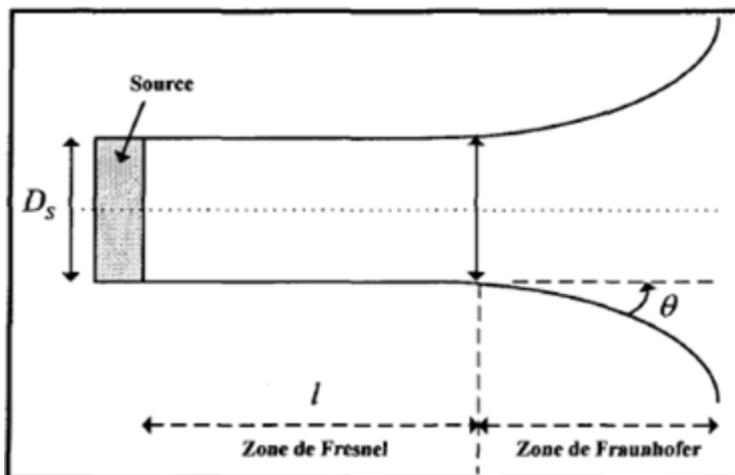
**II.7.1.2 Zone distale : Zone de Fraunhofer**

Elle correspond à la partie du faisceau située à une distance de la zone supérieure de  $r^2/\lambda$ . dans cette zone, le faisceau est plus homogène que dans la zone de Fresnel, mais il se met à diverger d'un angle  $\theta$  figure (II.8) par rapport à l'axe central. L'angle de divergence est proportionnel à la fréquence et au diamètre de la source et est exprimé par la relation suivante [83, 89]:

$$\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D_s} = 1.22 \frac{V}{D_s f} \dots\dots\dots (II.12)$$

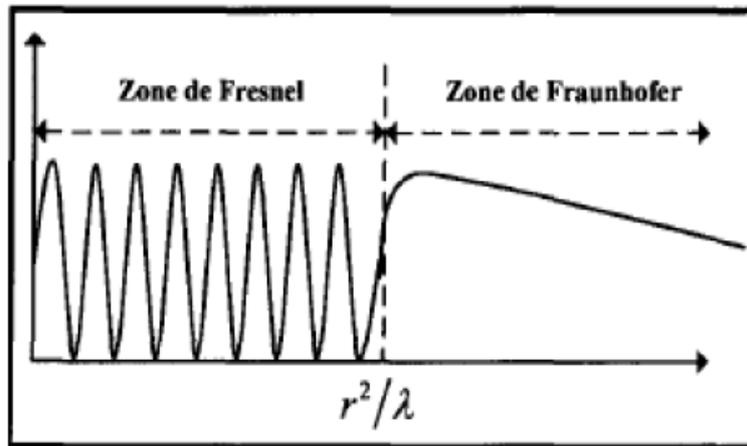
ou:

- $\theta$  est l'angle de divergence en degrés;
- $D_s$  est le diamètre de la source en m;
- $V$  est la vitesse du son en  $m.s^{-1}$ ;
- $f$  est la fréquence en Hz.



**Figure II.8:** Géométrie d'un faisceau d'onde ultrasonore

Comme le montre la figure (II.8), en s'éloignant de la source ultrasonore, l'intensité de l'onde devient faible car l'énergie se répartit.



**Figure II.9:** Représentation du champ de Fresnel et du champ de Fraunhofer pour un élément piézo-électrique de diamètre  $D_s$  [90].

### II.7.2 Atténuation des ondes

L'atténuation peut être définie de façon générale comme la diminution de l'amplitude et une perte fréquentielle des hautes fréquences du signal propagé en fonction du milieu de propagation. L'atténuation de l'amplitude de l'onde lors de sa propagation dans les bétons est le résultat des phénomènes suivants [91]:

- La divergence géométrique de l'énergie distribuée sur la surface du front d'onde. Ce facteur est une propriété extrinsèque qui dépend seulement de la forme du front d'onde et de l'éloignement de la source.
- L'absorption de l'énergie causée par l'interaction entre l'onde et le milieu poreux (le béton). C'est une propriété intrinsèque au milieu de propagation qui qualifie la viscoélasticité du matériau.
- La diffusion de l'énergie de l'onde sur les interfaces mortiers-granulats par réflexion et réfraction. Ce facteur est beaucoup plus important que l'absorption, il dépend de la microstructure du béton (défaut, grains, pores, microfissure, etc.).

L'atténuation du signal acoustique est caractérisée par le coefficient  $\alpha(\omega)$ . Elle est souvent exprimée au moyen de plusieurs paramètres : coefficient d'atténuation  $\alpha$ , décrement logarithmique et facteur de qualité  $Q$ . Le coefficient d'atténuation  $\alpha(\omega)$  (exprimé en unité Néper/m, dB/m ou en dB/ $\lambda$  est mesuré à partir de la comparaison des amplitudes spectrales de l'onde à deux points distants de la source respectivement de  $S_i$  et  $S_j$ . la formule appliquée usuellement pour la détermination de l'atténuation [92]:

$$S_i(X_i, \omega) = \frac{A e^{-\alpha(\omega)R_i}}{R_i} \dots\dots\dots \text{(II.13)}$$

$$S_j(X_j, \omega) = \frac{A e^{-\alpha(\omega)R_j}}{R_j} \dots\dots\dots \text{(II.14)}$$

De II.13 et de II.14, on obtient le coefficient d'atténuation  $\alpha(\omega)$  en dB/m [85]:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{X_i - X_j} \left[ 20 \log \left( \frac{S_i}{S_j} \right) - 10 \log \left( \frac{X_i}{X_j} \right) \right] \dots\dots\dots \text{(II.15)}$$

Le décrément logarithmique est défini à travers un système oscillant en vibrations libres et s'écrit :

$$\delta = \log \frac{S_i}{S_{i+1}} \dots\dots\dots \text{(II.16)}$$

Où  $S_i$  et  $S_{i+1}$  sont les amplitudes de deux oscillations consécutives.

**II.7.3 Méthodes de mesure de la vitesse et l'atténuation ultrasonore**

Les méthodes de caractérisation sont nombreuses. Celles utilisées pour mesurer l'atténuation ultrasonore peuvent être regroupées en trois catégories principales :

- les mesures au contact, pour lesquelles le (ou les) transducteur(s), piézoélectriques, sont en contact direct soit avec la pièce via un couplant, soit avec une pièce tampon elle-même en contact avec la pièce à caractériser,
- les mesures sans contact, c'est-à-dire les méthodes de mesure ne nécessitant aucun intermédiaire spécifique entre le capteur et la pièce,
- les mesures en immersion, où les transducteurs, piézoélectriques, peuvent être plus ou moins éloignés de la pièce, le dispositif étant plongé dans l'eau afin de permettre une meilleure propagation des ondes ultrasonores [93].

**II.5. Conclusion**

L'utilisation des ultrasons est un outil très adapté pour l'évaluation non destructive des bétons. La vitesse et l'atténuation des différents types d'ondes dépendent directement des propriétés mécaniques, d'où, l'utilisation des ondes se propageant le long de la surface permet de donner des informations sur le béton à savoir sa maturité, son homogénéité, la détection d'un ou plusieurs défauts, le suivi des défauts dans le temps, et ses caractéristiques mécaniques et physiques (résistance mécanique, porosité, perméabilité, etc...). L'utilisation de la vitesse et l'atténuation des ondes ultrasonores de surface pour la caractérisation de deux principaux indicateurs physique de durabilité du béton qui sont la porosité et la perméabilité fait l'objet des chapitres suivants (III et IV).

---

## **CHAPITRE III**

# **Matériaux et techniques expérimentales**

---

### III.1 Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous présenterons la caractérisation des matériaux de base pour la confection des bétons envisagés. Il s'agit des caractéristiques physico-chimiques, mécaniques et minéralogiques relatives au ciment, granulats, sable, eau de gâchage, ajouts (filler calcaire, laitier des hautes fournaux, et fumée de silice), et superplastifiant (SP40).

Nous présenterons par la suite, dans la deuxième partie, les procédures et techniques utilisées pour caractériser les bétons d'étude à l'état frais et à l'état durci. A l'état frais on déterminera l'affaissement et à l'état durci: la résistance mécanique, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'eau et à l'air, la vitesse et l'atténuation des ondes ultrasonores en mode de surface.

### III.2 Caractéristiques des matériaux utilisés

Pour la confection des éprouvettes de béton envisagé, nous avons utilisé du ciment, des granulats (sable et gravier), de l'eau, un adjuvant (superplastifiant SP 40) et des ajouts (filler calcaire, laitier des hautes fournaux, et fumée de silice).

#### III.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment CPJ-CEM II 42.5 provenant de la cimenterie de Hadjar-Soud (Wilaya de Skikda, Algérie), ses caractéristiques chimiques et physiques sont présentées dans le tableau (III.1).

**Tableau III.1:** Caractéristiques chimiques et physiques du ciment utilisé.

Caractéristiques chimiques et physiques	Valeur
CaO	59-62
SiO <sub>2</sub>	22-24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.3-6.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.0-4.0
MgO	1.5-1.8
K <sub>2</sub> O	<0.9
Na <sub>2</sub> O	<0.7
SO <sub>3</sub>	1.8 - 2.2
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3.16
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.12
Surface spécifique (m <sup>2</sup> /kg)	3630

### III.2.2 Sable

Nous avons utilisé deux types de sable, un sable naturel roulé (S1) moyen de couleur jaunâtre et de classe (0/4). Il est issu d'une sablière située à Oum Ali, dans la wilaya de Tébessa (Algérie) et un sable calcaire concassé (S2) de classe (0/5) provenant de la carrière de Boucelba, dans la wilaya de Guelma (Algérie). Ses caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau (III.2) qui suit:

**Tableau III.2:** Caractéristiques des sables utilisés.

Caractéristiques	Sable (S1)	Sable (S2)
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.56	2.56
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.54	1.49
Module de finesse	2.36	3.51
Equivalent du sable visual (%)	82	76.29
Teneur en eau (%)	2.66	14

### III.2.3 Gravier

Pour l'élaboration des bétons, un gravier calcaire concassé provenant de la carrière de Boucelba dans la région de Guelma, a été utilisé. Il s'agit d'un gravier concassé d'étendue granululaire 5/15. Ses caractéristiques physiques sont regroupées dans le tableau (III.3) qui suit:

**Tableau III.3:** Caractéristiques du gravier utilisé.

Caractéristiques	Valeur
Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	2.17
Masse volumique apparente (g/cm <sup>3</sup> )	1.41
Teneur en eau (%)	2.59

### III.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée est l'eau du robinet du laboratoire LGCH de l'université de Guelma ayant un pH voisin de 7.

### III.2.5 Adjuvant

C'est un superplastifiant (SP) haut réducteur d'eau (Medaplast SP40) à base d'Éther polycarboxylates, fabriqué en Algérie par la société GRANITEX implantée à Oued Smar, conforme à la norme EN 934-2. Sa plage normale d'utilisation est fixée par la fiche technique de 0.6 à 2.5 % (en extrait sec) du poids de ciment [Fiche technique].

Les caractéristiques de Medaplast SP40 sont:

Aspect ..... Liquide.  
 Couleur ..... Marron.  
 pH ..... 8.2.  
 Densité .....  $1.2 \pm 0.01$ .  
 Teneur en chlore .....  $< 1\text{g/ L}$ .  
 Extrait sec ..... 40 %.

### III.2.6 Les additions

#### III.2.6.1 Les fillers calcaire

Des fillers calcaire qui sont des Carbonates de Calcium sous forme de poudre ( $\text{CaCO}_3 = 98\%$ ) provenant du l'entreprise nationale des granulats ENG d'El-Khroub (département de Constantine, nord Algérien), dont les principales caractéristiques

- **Caractéristiques chimique**

**Tableau III.4 : Caractéristiques chimiques**

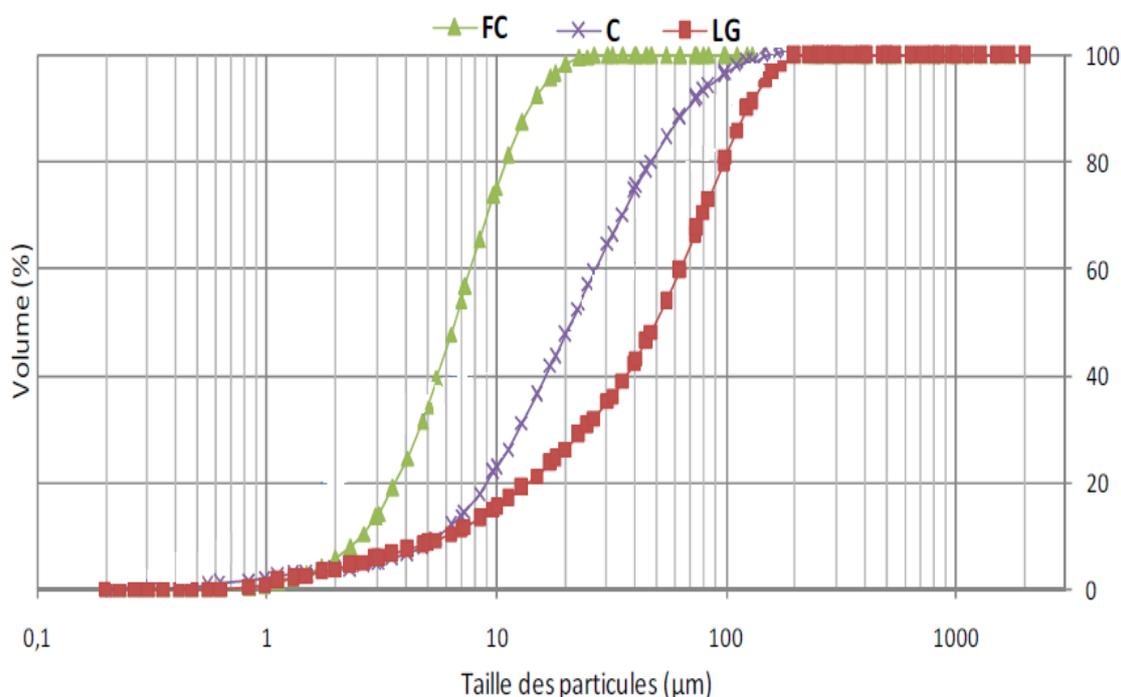
Caractéristiques	Valeur
CaO	59-62
SiO <sub>2</sub>	22-24
Na <sub>2</sub> O	< 0.07
MgO	1.5 - 1.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.3 – 6.0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.0 – 4.0
K <sub>2</sub> O	< 0.9
SO <sub>3</sub>	1.8 – 2.2

- **Caractéristiques physique**

**Tableau III.5 :** Caractéristiques physiques

Caractéristiques physique	Valeur
Masse volumique réelle ( $\text{kg/m}^3$ )	2700
Masse volumique en vrac ( $\text{kg/m}^3$ )	1100
Valeur de bleu de méthylène $\text{MB}_f$ gr/kg	1.67

- **Répartition granulométrique**



**Figure III.1:** Courbes granulométriques du ciment et des additions [107-108].

### III.2.6.2 Laitier des hauts fourneaux

Le laitier provient des hauts fourneaux du complexe sidérurgique d'El Hadjar. C'est un laitier obtenu par broyage à sec en laboratoire des matériaux au département de génie civil, université Badji Mokhtar-Annaba et dont les principales caractéristiques sont consignées dans le tableau III.6.

**Tableau III.6:** Composition chimique moyenne du laitier Cristallisé utilisé

Caractéristiques	Valeur	Caractéristiques	Valeur
CaO (%)	36-46	K <sub>2</sub> O (%)	0.5
SiO <sub>2</sub> (%)	35-45	Na <sub>2</sub> O (%)	0.3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	4-12	MnO (%)	1.3-2.5
Fe <sub>2</sub> (%)	0.5-19	S (%)	0.5-0.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.1	Indice de basicité	0.98-1.2
MgO (%)	3-8		

### III.2.6.3 Fumée de silice

Elle est à base de microsilice provenant de la société « GRANITEX » sous forme de poudre, cette fumée de silice est désignée par le nom « MEDAPLAST HP », ses caractéristiques physiques et chimiques sont représentées au tableau (III.7):

**Tableau III.7:** Composition chimique et physique du fumée de silice utilisé

Caractéristiques	Valeur
SiO <sub>2</sub> (%)	> 85%
SO <sub>3</sub> (%)	< 2,5%
Cl (%)	< 0,2%
Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )	0,5
Densité absolue (g/cm <sup>3</sup> )	1,87
Air massique	> 15 (m <sup>2</sup> /gr)
Taille des particules	< 0.1 (micron)

### III.3 formulation des bétons

Pour enrichir cette étude et pour avoir une variété dans les résultats des essais physico-mécaniques et de durabilité, nous avons cherché à formuler différents types de béton (béton ordinaire, béton autoplaçant et béton à haute performance).

### III.3.1 Formulation des bétons ordinaires

La formulation des bétons ordinaires utilisés est celle de Dreux-Gorisse dreux et Festa [101]. Six rapports Eau/Ciment (E/C) ont été adoptés (E/C = 0.47, 0.52, 0.55, 0.60, 0.65 et 0.70). A cet effet, 6 mélanges du béton ordinaire (BO) ont été préparés: BO1, BO2, BO3, BO4, BO5 et BO6. L'essai d'affaissement au cône d'Abrams a été effectué pour déterminer les propriétés des BO à l'état frais. Dix huit (18) éprouvettes conservées dans l'eau ont été écrasées après âge de 28 jours pour la détermination de la résistance à la compression. La formulation obtenue est présentée dans le Tableau III.8 ci-après.

**Tableau III.8:** Composition des bétons ordinaires

Composition (kg/m <sup>3</sup> )	BO <sub>0.47</sub>	BO <sub>0.52</sub>	BO <sub>0.55</sub>	BO <sub>0.60</sub>	BO <sub>0.65</sub>	BO <sub>0.70</sub>
Ciment	400	400	400	400	400	400
Eau	188	210	220	240	260	280
Sable (S2)	813	813	813	813	813	813
Gravier	946	946	946	946	946	946
E/C	0.47	0.52	0.55	0.60	0.65	0.70
Essais au cône d'Abrams (cm)	6	7	9	13	17	25
F <sub>C28</sub> (MPa)	28	27	26	22	20	19

### III.3.2 Formulation des bétons autoplaçant

Pour la formulation du béton autoplaçant, on a suivi les recommandations de l'AFGC qui permettent de garantir l'autoplaçabilité du béton. Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1 m<sup>3</sup> de béton sur la base des paramètres suivants [107-108]:

- Un dosage en liant, constitué de ciment CPJ 42.5 est maintenu fixe à 400 Kg/m<sup>3</sup>,
- Un pourcentage en addition (= 20%) ;
- Un rapport E/C = 0,5;
- Un dosage en adjuvant.

Avant le coulage, une variété de tests ont été effectués pour déterminer les propriétés du BAP à l'état frais, il s'agit de : diamètre d'étalement, V-Funnel, boîte en L et stabilité au tamis. Deux mélanges différents ont été préparés: BAP<sub>F</sub> (filler) et BAP<sub>L</sub>

(laitier). Six (6) éprouvettes conservées dans l'eau ont été écrasées après âge de 28 jours pour la détermination de la résistance à la compression. La formulation ainsi obtenue est présentée dans le Tableau III.9 ci-dessous.

**Tableau III.9:** Compositions et paramètres de formulation des BAP

Composition (kg/m <sup>3</sup> )	BAP <sub>F</sub>	BAP <sub>L</sub>
Ciment	400	400
Fillers calcaires	80	-
Laitier	-	80
Medaplast SP 40	6.2	6.2
Sable (S1)	765	765
Gravier	865	865
Eau	200	200
Rapport G/S	1,13	1,13
Rapport E/C	0,50	0,50
Essais au cône d'Abrams (cm)	68	72
Essai boîte en L	0,89	0,84
Essai au tamis %	8,33	9,27
F <sub>C28</sub> (MPa)	25	27

### III.3.3 Formulation des bétons à haute performance

La méthode de formulation adoptée pour le mélange des constituants entrant dans la composition de deux BHP est celle de l'Université de Sherbrooke élaborée par P.C.Aïtcin et son équipe [105-106], consiste à :

- cibler une bonne ouvrabilité,
- déterminer un dosage en ciment optimal,
- déterminer un dosage optimal en superplastifiant et du rapport  $E/C \leq 0.40$ ,
- une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa.

Le tableau III.10 présente la formulation complète du BHP pour des rapports eau/ciment ou eau/liant de 0,27 et 0,30.

**Tableau III.10:** Compositions et paramètres de formulation des BHP

Composition (kg/m <sup>3</sup> )	BHP <sub>0,27</sub>	BHP <sub>0,30</sub>
Ciment	475	475
Fumée de silice (Medaplast HP)	45	45
Medaplast SP 40	35	35
Sable (S1)	588	588
Gravier	1070	1070
Eau	130	150
Rapport G/S	1,82	1,82
Rapport E/C	0,27	0,30
Essais au cône d'Abrams (cm)	20	22
F <sub>C28</sub> (MPa)	58	51

### III.3.4 Confection des éprouvettes

Les essais expérimentaux sont réalisés sur des poutrelles 15×15×100 cm<sup>3</sup>, des éprouvettes cubiques de 10×10×10 cm<sup>3</sup> et de 15×15×15 cm<sup>3</sup> et des éprouvettes cylindriques avec un diamètre de 15 cm et une hauteur de 5 cm.

Dix (10) mélanges différents ont été préparés: Six (6) BO, deux (2) BAP et deux (2) BHP.

Avant le coulage, une variété de tests ont été effectués pour déterminer les propriétés de différents types de béton (BO, BAP et BHP) à l'état frais, il s'agit de : essai au cône d'Abrams, V-Funnel, boîte en L et stabilité au tamis.

Deux cent dix (210) éprouvettes ont été confectionnées. Trente (30) éprouvettes ont été écrasées à l'âge de 28 jours pour les essais de résistance à la compression, trente (30) pour les essais de la porosité, soixante (60) pour les essais de la perméabilité à l'air « trente (30) pour chaque mode de cure à l'air libre et dans l'eau », soixante (60) pour les essais de la perméabilité à l'eau « trente (30) pour chaque mode » et trente (30) poutrelle pour les essais d'auscultations,

### III.3.5 Cures appliquées :

Deux types de cures ont été appliqués avant les essais sur les éprouvettes de perméabilité (à l'air et à l'eau), à savoir :

- cure à l'air libre: aucun échange hydrique avec le milieu extérieur entre l'instant de décoffrage des éprouvettes et l'essai (Les éprouvettes ont été conservées au niveau du laboratoire LGCH).

- cure dans l'eau: Les éprouvettes ont été démoulées 24 heures après le coulage et conservées dans l'eau pendant 28 jours, à température ambiante au niveau du laboratoire LGCH.

Il est à noter que pour les différentes formulations du béton, trois éprouvettes ont été utilisés pour chaque mode de cure et pour effectuer chaque essai.

### III.4 Techniques expérimentales

Différents essais ont été effectués afin de déterminer les propriétés physico mécaniques et de durabilité des mortiers d'étude en faisant varier le pourcentage des granulats de caoutchouc et déchets de brique en comparant ceux-ci aux propriétés des mortiers témoins à différents échéances d'âges.

#### III.4.1 Essai d'auscultation sonore

La caractérisation in situ des structures en béton par des mesures indirectes des ondes ultrasonores s'effectue principalement lorsque l'accès à deux faces n'étant pas possible, comme (planches, voiles, ponts ...). Pour effectuer cette mesure, placer l'émetteur et le récepteur sur la même face plane de l'élément à tester, l'émetteur est fixe, le récepteur se déplace suivant l'axe de l'émetteur, à chaque déplacement en effectuant une mesure. Le test est conforme à la norme EN12504-4 (2004) [89, 99]. Le dispositif comprend un générateur d'impulsions électriques (UPV-E49 marque Controls) mesure l'intervalle du temps entre le début d'une impulsion générée et le début de son arrivée, une paire de transducteurs, un oscilloscope numérique (Tektronix TDS 1012B) pour enregistrer les signaux des impulsions et un PC pour stocker et numéroter les signaux figure (III.2). Une série de mesures est effectuée pour les différentes distances du récepteur notant le temps de propagation et l'amplitude  $S(t, X_i)$  crête à crête du signal. La vitesse des ondes indirecte est estimée à partir de la pente de la courbe linéaire présentée sur figure (III.3). On déduit l'atténuation des amplitudes en fonction de la distance de propagation. Les changements d'amplitude peuvent

être attribués directement au comportement atténuant du matériau [98, 99]. Le coefficient d'atténuation  $\alpha$  est exprimé en dB/m et calculé à partir de l'équation (II.15) suivante:

$$\alpha(\omega) = \frac{1}{X_i - X_j} \left[ 20 \log \left( \frac{S_i}{S_j} \right) - 10 \log \left( \frac{X_i}{X_j} \right) \right]$$

pour chaque paire  $i, j$  dans l'ensemble de  $i = 1 \dots j \dots 6$ , puis moyenné, permettant d'avoir une estimation fiable et robuste de l'atténuation pour chaque spécimen [102], où  $S_i$  et  $S_j$  sont les amplitudes du spectre et  $X_i$ ,  $X_j$  sont les pas de mesure du récepteur. Les résultats préliminaires donnent des valeurs négatives sous-estimées. Une certaine perte d'énergie peut être causée par les effets du couplage et la rugosité de la surface d'éprouvette. Sachant que le couplage ne puisse jamais être identique dans tous les essais [103, 126]. De ce fait et pour assurer la fiabilité de ce travail on a utilisé un coffrage de bonne qualité (des parois lisses) pour la réalisation des poutres, qui nous a donné des surfaces de bonne qualité de finition (lisses et parfaitement parallèles), cela nous permette l'utilisation seulement d'une couche fine du coupleur. Toutes les mesures ont été effectuées par le même opérateur suivant la même procédure tout au long de la série expérimentale, en minimisant les effets aléatoires. En dehors de cela, il a été assuré que, lorsque les capteurs sont posés sur la surface des spécimens et avant le début du test, les fréquences les plus basses ont été transmises clairement. Cela garantit que le couplage est approprié et que toutes les autres fréquences utilisées dans l'essai sont transmises de manière fiable. Les valeurs d'atténuation sont absolues car aucune correction de diffraction n'a été effectuée sur les courbes d'atténuation. Le choix d'un capteur met en jeu plusieurs facteurs pour lesquels il faut trouver des compromis. La fréquence et la taille des capteurs font varier l'angle d'élargissement et la taille de la zone proche. Les spécimens utilisés ont une dimension de  $15 \times 15 \times 100 \text{ cm}^3$ . Un total de six mesures indirectes a été effectué sur chaque spécimen de béton. Le transducteur de réception a été éloigné du transducteur d'émission à partir d'une séparation de centre à centre de 5 à 95 cm avec un incrément de 15 cm. Un minimum de trois éprouvettes est nécessaire pour caractériser chaque béton.

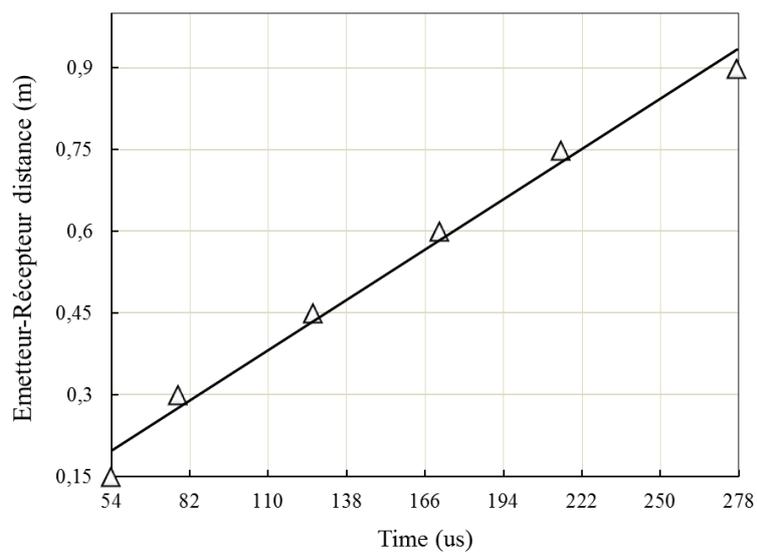
Dans le but d'enrichir cette étude et pour avoir plusieurs acquisitions des vitesses et des signaux ultrasonores, nous avons utilisé quatre différents transducteurs en fait variant le diamètre et la fréquence. Les caractéristiques de différents transducteurs utilisés sont présentées dans le tableau III.11



**Figure III.2:** Dispositif expérimental pour la mesure de la vitesse et de l'atténuation des ondes ultrasonores indirectes

**Tableau III.11:** Caractéristiques de différents transducteurs utilisés

Transducteurs	Diamètre (mm)	Fréquence (khz)
d'	28.5	150
D	49.5	54
D'	49.5	25
d	7.5	54



**Figure III.3:** Mesure de la vitesse d'onde indirecte par régression.

### III.4.2 Essai de porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau a été mesurée par pesée hydrostatique, suivant la norme NF EN 18-459. Les mesures ont été effectuées après conservation des éprouvettes cylindrique 15x5 cm<sup>3</sup> dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours. Cette mesure simple, praticable sur une large variété de pâtes de ciment, mortiers ou bétons, est considérée comme un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. C'est en effet un indicateur de la qualité du matériau. Elle est calculée grâce à la différence de masse entre un échantillon à l'état sec et ce même échantillon à l'état saturé.

Cette méthode (pesée hydrostatique) présentée dans la figure III.4 étant certainement la plus simple parmi toutes celles permettant d'accéder aux différents indicateurs de durabilité, les spécifications proposées sont préférentiellement basées sur la porosité à l'eau. L'essai comprend les étapes suivantes :

- **Pesée hydrostatique**

Cette pesée s'effectue en immergeant complètement l'éprouvette à l'aide d'une balance hydrostatique (précision de 0.01 g) pour obtenir  $M_{\text{eau}}$  de l'éprouvette immergée dans l'eau.

- **Pesée à l'air**

Après la pesée à l'eau, il faut essuyer rapidement et superficiellement l'éprouvette avec un chiffon sec sans toutefois retirer l'eau des pores. Ensuite peser immédiatement l'éprouvette à l'air à 0.01 g près. On obtient de cette manière, la masse  $M_{\text{air}}$  de l'éprouvette imbibée. Pour mieux caractériser un béton, l'essai est réalisé sur trois échantillons.

- **Pesée à sec**

S'effectue par étuvage de l'échantillon à une température de  $105 \pm 5$  °C jusqu'à stabilisation de la masse, c'est-à-dire lorsque deux pesées consécutives espacées de 24 heures ne diffèrent pas de plus de 0.05 %. La masse ainsi déterminée est la masse de l'éprouvette sèche  $M_{\text{sec}}$ .

On utilise la formule suivante pour calculer la porosité accessible à l'eau  $P$  :

$$P = \frac{(M_{\text{air}} - M_{\text{sec}})}{(M_{\text{air}} - M_{\text{eau}})} \dots \dots \dots \text{(III.1)}$$



**Figure III.4:** Dispositif pour la mesure de la porosité accessible à l'eau

### III.4.3 Essais de perméabilité

La perméabilité du béton et du mortier est un autre paramètre fondamental contrôlant la durabilité des structures. C'est l'aptitude d'un corps à se laisser pénétrer et traverser par l'air, par la vapeur d'eau ou par l'eau à l'état liquide. Elle est directement liée aux caractéristiques du réseau poreux (forme, dimension, distribution, connectivité, etc.).

#### III.4.2.1 Perméabilité à l'air

La perméabilité aux gaz permet de caractériser la capacité du béton à permettre le transfert d'un gaz au travers de sa porosité. Il constitue à ce titre un indicateur de durabilité du matériau, notamment vis-à-vis des gaz pouvant réagir chimiquement avec les hydrates (carbonatation due au dioxyde de carbone). L'objectif de cet essai est de mesurer le débit volumique de gaz, en l'occurrence l'air comprimé, traversant en régime permanent un échantillon de matériau à base de liant hydraulique soumis à un gradient de pression constant, puis par application de la loi de Darcy d'en déduire la perméabilité aux gaz.

Cet essai de perméabilité a été effectué sur des éprouvettes cylindriques de mortier durci, de 150 mm de diamètre et 50 mm de hauteur. Trois échantillons ont servi à la caractérisation d'une seule formulation.

L'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à un gradient de pression de gaz constant. La perméabilité est déterminée à partir de la mesure du flux en régime permanent à l'aide d'un perméamètre à oxygène à charge constante de type CONTROLAB (Figure III.5). La face latérale de l'éprouvette est enveloppée par un film étanche afin d'avoir un flux de gaz unidirectionnel.



**Figure III.5:** Vue générale du perméamètre à gaz CEMBUREAU

L'échantillon est disposé dans une cellule appropriée (Figure III.6). Ses deux faces planes reposent sur une plaque striée permettant une répartition homogène de la pression, la face circulaire est entourée d'un manchon néoprène étanche.



**Figure III.6:** Intérieur d'une cellule de perméabilité

- a: Echantillon de béton.
- b: Manchon en polyuréthane étanche.
- c: Chambre à air gonflable.
- d: Couvercle avec fixations.

Les essais de perméabilité au gaz (air comprimé) effectués comprennent en général plusieurs mesures de perméabilité apparente  $k_a$  relatives à différentes pressions différentielles.

Chaque test de perméabilité comprend alors des mesures de débit relatives à cinq pressions différentielles d'injection s'étageant autour des valeurs suivantes 1.5 – 2 – 2.5 – 3 et 3.5 bars de manière à obtenir une précision de mesure satisfaisante. Pour des éprouvettes perméables, ces pressions pourraient être, par exemple: 1. 5, 2.0 et 2.5 bars. Pour les spécimens de test qui ne sont pas perméables, les niveaux de pression de 2.5, 3.0 et 3.5 bars sont recommandés.

Les débits de gaz sont mesurés à pression atmosphérique à l'aide d'un débitmètre à bulle comprenant une série de quatre tubes calibrés de 1.5, 5, 20 et 160 cm<sup>3</sup>. Les tubes sont choisis de telle façon que la bulle de savon parcourt une distance maximum pendant une durée comprise entre 20 et 60 secondes conformément aux recommandations. Pour chaque pression d'injection [100], cinq mesures de débit au minimum sont effectuées durant une période d'au moins 15 minutes.

Le tube de mesure capillaire choisi (donc le volume) est correct quand le temps mesuré pour qu'une bulle de savon passe à travers tout le volume est  $\geq 30$  secondes. Si le temps mesuré est inférieur à 30 s, alors on doit choisir un tube de mesure capillaire plus grand (donc un plus grand volume). Si le temps de mesure est plus long, on doit utiliser un tube de mesure capillaire plus petit (donc un volume inférieur) [96].

Un temps suffisamment long est requis entre deux mesures afin que l'écoulement de gaz puisse s'établir en régime permanent à travers l'échantillon. Généralement un temps de 30 minutes suffit pour que l'écoulement soit stable et établi. Dans la pratique, après chaque incrément de pression, un temps minimum de 30 minutes, plus souvent 1 heure, est attendu avant que les premières mesures de débit ne soient effectuées. L'étalement des mesures sur une durée de 15 minutes permet de vérifier que le régime d'écoulement est établi.

Si les débits mesurés durant cette période diffèrent de plus de 2%, un temps supplémentaire de 30 minutes est attendu à nouveau avant de procéder aux mesures de débit pour la même pression d'injection [95].

La pression relative ( $P - P_{atm}$ ) appliquée à l'échantillon est mesurée avec un manomètre digital de 1 hPa de précision. Pour chaque pression différentielle la perméabilité apparente  $k_a$  est calculée à partir de l'équation Hagen-Poiseuille pour un écoulement laminaire visqueux [77, 94].

$$K_a = \frac{Q}{A} \frac{2\eta \cdot P_{atm} \cdot H}{(P^2 - P_{atm}^2)} \text{ (m}^2\text{)}$$

Où

$K_a$ : Coefficient spécifique de perméabilité, (en  $m^2$ ).

$Q$ : Débit volumique mesuré à la pression atmosphérique ( $m^3/s$ ).

$H$ : Hauteur du spécimen de test dans le sens du flux (m).

$A$ : Zone en coupe du spécimen de test ( $m^2$ ).

$\eta$ : Viscosité dynamique du gaz de test.

Oxygène à 20°C  $\eta = 2.02 \times 10^{-5}$  (Ns/m<sup>2</sup>).

Air à 20° C  $\eta = 1.82 \times 10^{-5}$  (Ns/m<sup>2</sup>).

$P$ : Pression d'entrée (absolue) en (N/m<sup>2</sup>).

$P_{atm}$ : Pression de sortie (pour ce test, elle correspond à la pression atmosphérique) (N/m<sup>2</sup>).

#### III.4.2.2 Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau)

La procédure de base d'un tel test consiste à appliquer de l'eau sous pression sur une surface de l'échantillon pendant une durée déterminée, puis à diviser l'échantillon perpendiculairement à la face injectée et à déterminer visuellement la profondeur de pénétration  $h$  (mm).

L'essai est effectué selon la norme allemande DIN 1048 sur des échantillons de béton de taille 150x150x150 mm<sup>3</sup>, à l'âge de 28 jours. L'ensemble des cellules d'essai utilisé permettait de tester trois éprouvettes à la fois. Une fois les échantillons assemblés dans les cellules d'essai, une pression d'eau de  $500 \pm 50$  kPa a été appliquée pendant 72 heures, de manière à ce qu'elle soit traversée de bas en haut suivant sa hauteur (écoulement unidirectionnel). La pression de l'eau est appliquée au moyen d'un arrangement constitué d'un réservoir d'eau relié à un compresseur d'air à travers une vanne, pour ajuster la pression. La surface de l'éprouvette qui reçoit la pression d'eau doit être rendue rugueuse à l'aide d'une brosse métallique immédiatement après le démoulage, il est recommandé de ne pas appliquer la pression d'eau sur la surface d'une éprouvette arasée à la truelle [94, 97].



**Figure III.7:** Dispositif de mesure de la perméabilité à l'eau

Au cours de l'essai, observer régulièrement l'apparence des surfaces de l'éprouvette d'essai non exposées à la pression d'eau pour noter l'éventuelle présence d'eau. En cas de fuite, s'interroger sur la validité de l'essai et consigner l'évènement.

Après rupture de l'éprouvette par fendage, on mesure la profondeur de pénétration d'eau à l'aide d'un pied à coulisse.

### III.5 Conclusion

Dans un premier temps, l'utilisation des différents matériaux a été justifiée pour la confection des différents types du béton BO, BAP et BHP en utilisant différents rapport E/C pour les BO et les BHP et différents additions minérales (FC et LG) pour les BAP avec deux modes de cure (sec et humides), ceci permettent d'avoir une variation dans les caractéristiques physiques (la porosité et la perméabilité) des bétons. La confection des bétons a été effectuée selon les normes en vigueur. Dans un deuxième temps, nous avons montré les méthodes d'essais de mesure les propriétés physiques (la porosité et la perméabilité) des bétons, qui sont considéré des indicateurs de leur durabilité, aussi la méthode d'essai non destructif par ultrason pour la caractérisation de ces indicateurs, dont les résultats sont présentés et discutés dans le chapitre suivant.

---

## **CHAPITRE IV**

# **Résultats des essais et discussions**

---

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'analyse des différents résultats relatifs aux essais non destructifs par les ultrasons (vitesses des ondes indirecte et leurs atténuations) et aux propriétés physiques (la porosité et la perméabilité) des bétons réalisés conformément aux méthodes décrites au chapitre précédent. Ce chapitre présente aussi les corrélations entre les vitesses ultrasonores, l'atténuation des ondes, la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'air et la perméabilité à l'eau, ainsi que l'effet du mode de cure (dans l'eau et à l'air libre) sur l'évolution des propriétés physiques des bétons et donc leur impact sur les corrélations.

### IV.2 Essais non destructifs par ultrasons

#### IV.2.1 Influence du rapport E/C sur l'évolution de la vitesse des ondes de surface

La figure VI.1 et le tableau IV.1 donnent l'évolution de la vitesse des ondes de surface pour les différents (BO et BHP) en fonction du rapport E/C et pour les quatre types de transducteurs.

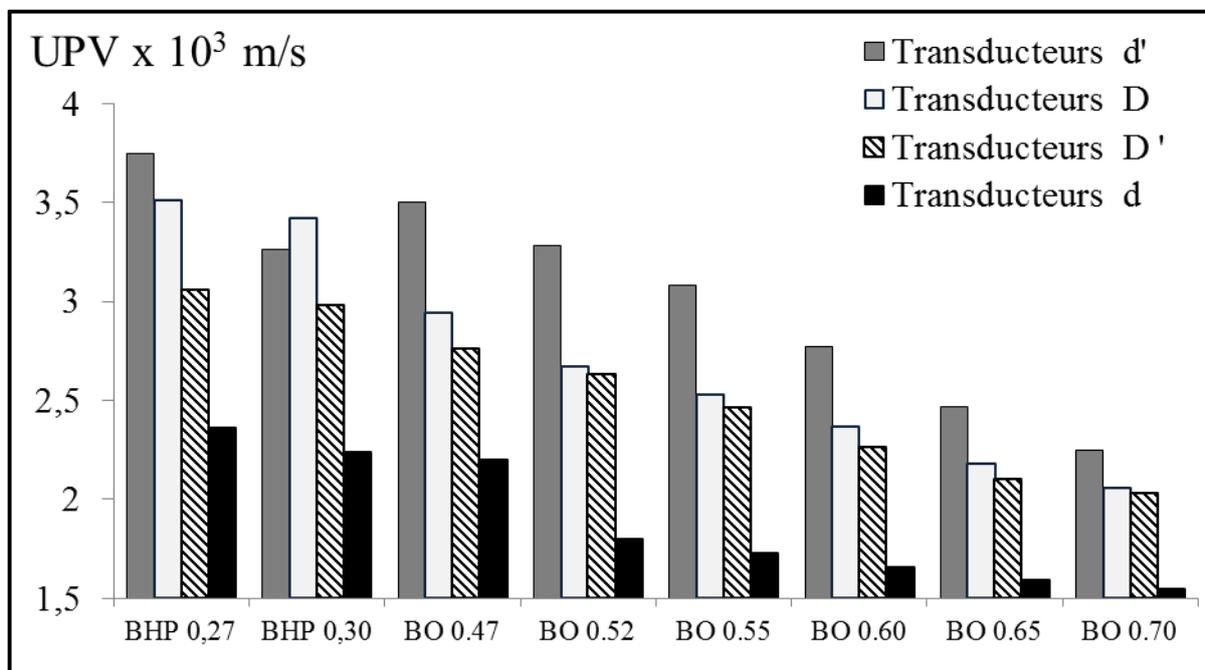


Figure IV.1: Variation de la vitesse en fonction du rapport E/C

**Tableau IV.1** : Vitesse dans les bétons en fonction du rapport E/C

Transducteurs			Vitesse ( $10^3$ m/s)							
Symbole	$f$ (kHz)	D (mm)	BO <sub>0.47</sub>	BO <sub>0.52</sub>	BO <sub>0.55</sub>	BO <sub>0.60</sub>	BO <sub>0.65</sub>	BO <sub>0.70</sub>	BHP <sub>0.27</sub>	BHP <sub>0.30</sub>
d'	150	28.5	3.50 ± 0.01	3.28 ± 0.17	3.08 ± 0.08	2.77 ± 0.06	2.47 ± 0.29	2.25 ± 0.03	3.75 ± 0.01	3.20 ± 0.07
D	54	49.5	2.94 ± 0.15	2.67 ± 0.13	2.53 ± 0.04	2.37 ± 0.03	2.18 ± 0.20	2.06 ± 0.09	3.51 ± 0.18	3.42 ± 0.12
D'	25	49.5	2.76 ± 0.21	2.63 ± 0.10	2.46 ± 0.08	2.26 ± 0.05	2.10 ± 0.28	2.03 ± 0.14	3.06 ± 0.01	2.98 ± 0.04
d	54	7.5	2.20 ± 0.02	1.80 ± 0.04	1.73 ± 0.03	1.66 ± 0.01	1.59 ± 0.05	1.55 ± 0.07	2.36 ± 0.05	2.24 ± 0.05

L'acquisition des quatre différents transducteurs montre une diminution de la vitesse des ondes de surface avec l'augmentation du rapport E/C, ceci est observé pour les deux types de béton BHP et BO. Dans les différents types du béton, la plus grande valeur de vitesse correspond au plus faible rapport E/C. Il est connu que les caractéristiques élastiques de propagation des ondes sont influencées par l'âge de maturité, la résistance à la compression et donc le rapport E/C des bétons [45, 127, 128, 129].

Une augmentation du rapport E/C de 49% pour les BO se traduit par une diminution de 36%, 30%, 23% et 10% de la vitesse ultrasonique acquise respectivement par les transducteurs d', D, D' et d. Une diminution du rapport E/C de 11% pour les BHP donne une diminution des vitesses de 13%, 2.5%, 2.6% et 5% correspondant aux différents transducteurs. Il est à noter que les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus par d'autres auteurs [123-141] et que les mesures de vitesses des ondes de compression montrent une très forte sensibilité au rapport E/C.

Le dosage en eau influence la microstructure du béton car le mélange du ciment et de l'eau déclenche des réactions d'hydratation permettant d'avoir un ensemble de phases durcies, des pores contenant ou non de l'eau et des interfaces granulats-pâte de ciment [72-75]. La vitesse des ultrasons est différente à travers une phase à une autre et l'ampleur de ces phases dépend du rapport E/C. On remarque une certaine relation inversement proportionnelle entre le rapport E/C et la vitesse des pulsations ultrasoniques.

### VI.2.2 Influence du type d'addition sur l'évolution de la vitesse des ondes de surface

Comme, on vient de le voir précédemment concernant la dépendance des vitesses de la structure du béton, le type d'ajout peut donc influencer cette vitesse. La figure VI.2 donne l'évolution de la vitesse des ondes de surface pour les BAP confectionnés par deux additions différentes (fillers calcaires et laitier granulé).

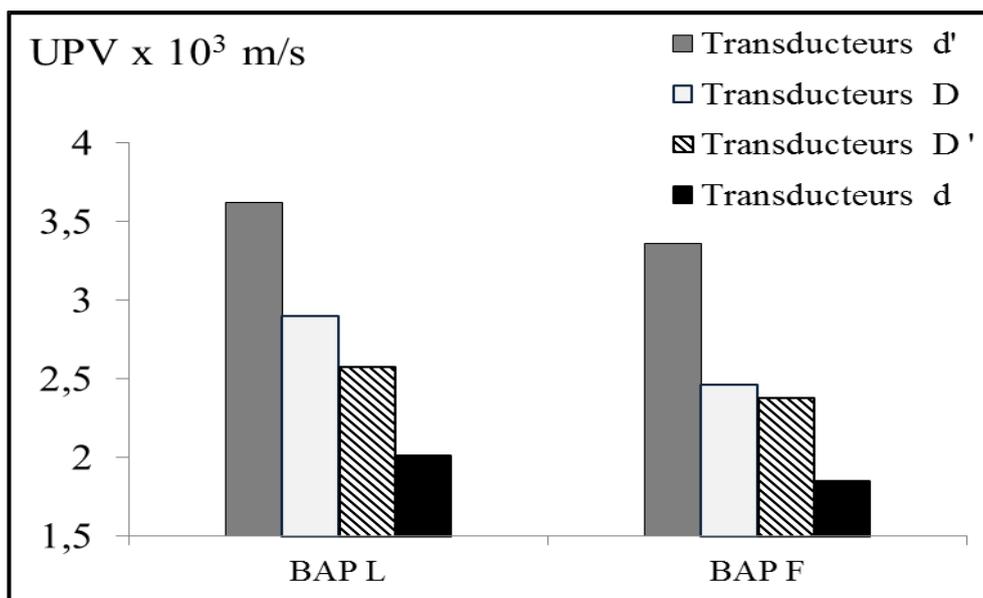


Figure IV.2: Variation de la vitesse en fonction du type d'addition pour les BAP.

Tableau IV.2: Evolution de la vitesse en fonction du type d'addition.

Transducteurs			Vitesse ( $10^3$ m/s)	
Symbole	D (mm)	f (khz)	BAP <sub>L</sub>	BAP <sub>F</sub>
d'	28.5	150	3.62 ± 0.26	3.36 ± 0.01
D	49.5	54	2.90 ± 0.07	2.46 ± 0.03
D'	49.5	25	2.58 ± 0.28	2.38 ± 0.09
d	7.5	54	2.01 ± 0.11	1.85 ± 0.11

Les vitesses des ondes de surface sont plus importantes dans le BAP à base de laitier que celle du BAP à base de fillers calcaires. Cette différence varie de 7% à 18%, elle est liée à l'effet du laitier sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques et physiques des bétons [130-133]. Ces dernières sont elles même liées à la vitesse de propagation des ultrasons. Ces résultats

obtenus confirment celles de Boucetta [22], où il indique que le laitier granulé réduit la porosité parallèlement à l'augmentation de la durée de cure, et permet ainsi d'obtenir de bien meilleures résistances à plus longues échéances, principalement par effet hydraulique et pouzzolanique, significatifs au-delà de 28 jours à cause d'une densification de la matrice cimentaire, tandis que le filler calcaire améliore les résistances mécaniques à court terme, ces dernières ayant tendance à se stabiliser au-delà de 28 jours. Boudchicha [23] trouve pour le laitier que les améliorations des propriétés mécaniques sont significatives à 20% du taux de substitution, et une finesse équivalente à celle du ciment, permet de garantir ces améliorations. Pour le filler calcaire, les améliorations de résistances à 28 jours, restent assez limitées à 10% du taux de substitution et qu'une finesse assez importante (environ 8000 cm<sup>2</sup>/g), est nécessaire pour garantir un minimum d'amélioration. Aussi les auteurs Shi et al. [44] trouvent pour un rapport E/L de 0,30, la résistance en compression des bétons à base de laitier granulé est beaucoup plus élevée que celle à base de fumée de silice, ceci pourrait être attribué à la capacité hydraulique latente du laitier granulé.

### VI.2.3 Influence de la fréquence et du diamètre des transducteurs sur la vitesse

Les vitesses déterminées par les transducteurs **d'** sont toujours supérieures à celles déterminées par les transducteurs **D**, **D'** et **d** (tab. IV.1 et IV.2). Ceci s'explique par le fait que près de la source ultrasonore, le faisceau est l'objet d'interactions vibratoires assez complexes donnant lieu à des maximums et des minimums d'énergie sur l'axe de propagation [109]. En utilisant les équations (II.11 et II.12) et à l'aide du tableau IV.3 qui montre les rapports entre les vitesses obtenues par les différents transducteurs.

**Tableau IV.3:** Rapports entre les vitesses obtenues par les différents transducteurs

Rapport entre vitesse	BO <sub>0.47</sub>	BO <sub>0.52</sub>	BO <sub>0.55</sub>	BO <sub>0.60</sub>	BO <sub>0.65</sub>	BO <sub>0.70</sub>	BHP <sub>0.27</sub>	BHP <sub>0.30</sub>	BAP <sub>L</sub>	BAP <sub>F</sub>	moy
V <sub>D</sub> /V <sub>d</sub>	1.34	1.48	1.46	1.43	1.37	1.33	1.49	1.53	1.44	1.33	<b>1.42</b>
V <sub>D</sub> /V <sub>D'</sub>	1.07	1.02	1.03	1.05	1.04	1.01	1.15	1.15	1.12	1.03	<b>1.07</b>
V <sub>d'</sub> /V <sub>D</sub>	1.19	1.23	1.22	1.17	1.13	1.09	1.07	0.95	1.25	1.37	<b>1.17</b>

On trouve pour les transducteurs de même fréquence et de diamètre différent :

$$V_D = 1.42 V_d \qquad D = 6.6 d \text{ (mm)} \qquad \sin(\lambda_D/2) \approx 0.2 \sin(\lambda_d/2)$$

donc,  $\alpha_D \approx 0.2 \alpha_d$  ..... (IV.1)

Et pour les transducteurs de différente fréquence, nous trouvons :

$$V_D = 1.07 V_{D'} \qquad f_D = 2.16 f_{D'} \qquad \sin(\alpha_D/2) \approx 0.5 \sin(\alpha_{D'}/2)$$

donc,  $\alpha_D \approx 0.5 \alpha_{D'}$  ..... (IV.2)

$$V_{d'} = 1.17 V_D \qquad f_{d'} = 2.78 f_D \qquad d' = 0.58 D \text{ (mm)} \qquad \sin(\alpha_{d'}/2) = 0.7 \sin(\alpha_D/2)$$

donc,  $\alpha_{d'} = 0.7 \alpha_D$  ..... (IV.3)

à partir des résultats (IV.1), (IV.2) et (IV.3) on constate que les transducteurs **d'** ont la faible divergence du faisceau ultrasonore, d'où une meilleure précision et une moindre perturbation des mesures par ces transducteurs dans ce cas précis. Donc l'augmentation de la fréquence et du diamètre des transducteurs améliorent la précision de l'acquisition des vitesses. Ces résultats concordent avec ceux avancés par Benouis et Grini [89] dans le cas de l'augmentation du diamètre des transducteurs.

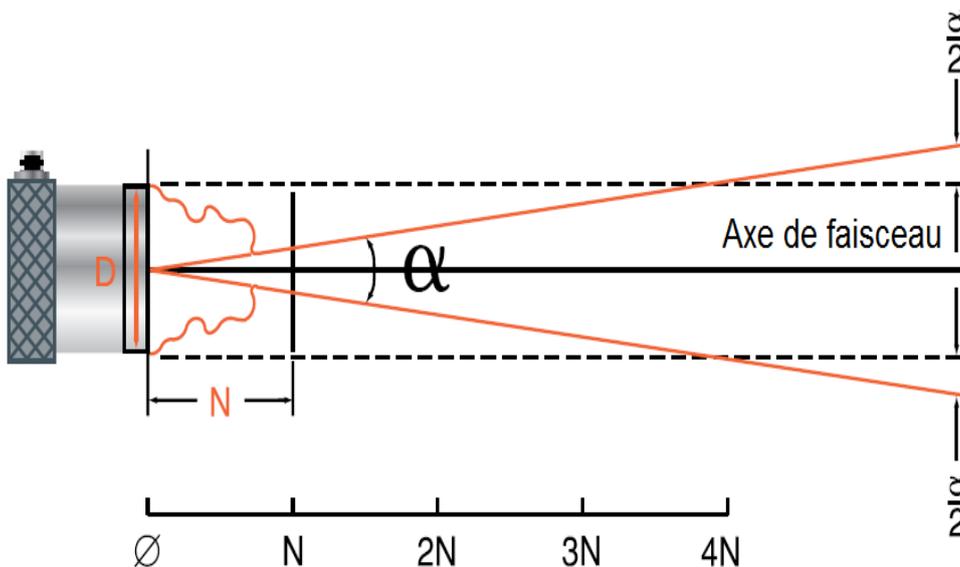


Figure IV.3: Vue simplifiée d'un faisceau sonore pour un transducteur

IV.2.4 Influence du rapport E/C sur l'atténuation

L'autre propriété ultrasonique exploitée dans notre travail est l'atténuation de l'amplitude des ondes. Comme pour la vitesse, on prospecte l'évolution de cette propriété avec le rapport E/C. Le tableau IV.4 et la figure IV.4 indiquent les atténuations des BO et BHP.

Tableau IV.4: Influence du rapport E/C sur l'atténuation des ondes de surface.

Transducteurs			Atténuation ( $10^{-1}$ db/m)							
Symbole	$f$ (khz)	D (mm)	BO <sub>0.47</sub>	BO <sub>0.52</sub>	BO <sub>0.55</sub>	BO <sub>0.60</sub>	BO <sub>0.65</sub>	BO <sub>0.70</sub>	BHP <sub>0.27</sub>	BHP <sub>0.30</sub>
d'	150	28.5	20.87 ± 0.42	24.44 ± 7.75	21.52 ± 7.13	24.78 ± 3.51	23.51 ± 4.54	30.33 ± 11.1	23.71 ± 5.61	35.10 ± 4.42
D	54	49.5	10.82 ± 4.77	13.31 ± 6.10	12.48 ± 6.28	11.17 ± 0.29	13.97 ± 9.09	18.41 ± 0.78	24.04 ± 5.16	26.01 ± 0.26
D'	25	49.5	10.16 ± 2.46	13.19 ± 1.20	11.30 ± 0.10	18.45 ± 8.9	17.02 ± 8.59	22.24 ± 9.1	20.40 ± 1.04	21.94 ± 5.94
d	54	7.5	12.55 ± 9.4	15.24 ± 5.16	15.49 ± 0.61	27.41 ± 14.37	30.18 ± 15.55	33.96 ± 16.76	24.76 ± 3.47	31.39 ± 9.92

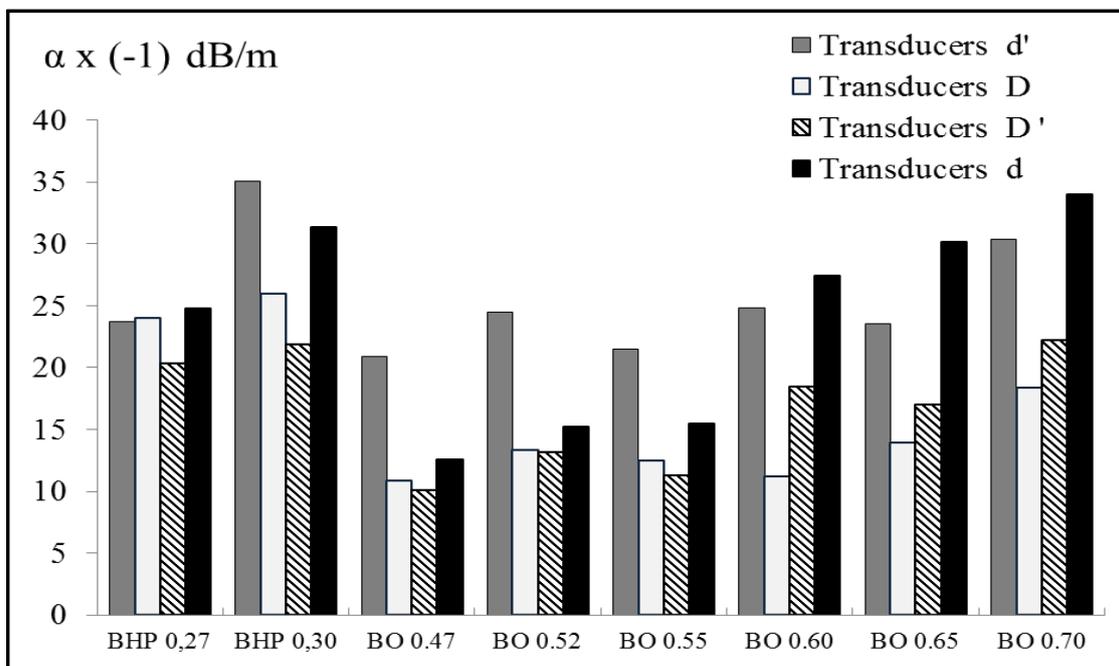


Figure IV.4: Influence du rapport E/C sur l'atténuation des ondes de surface.

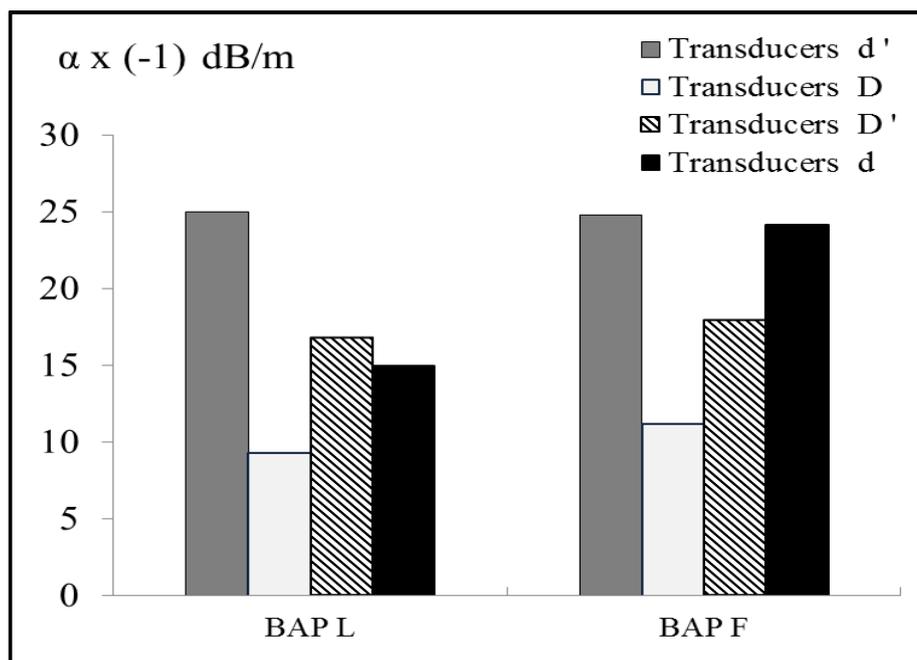
L'atténuation des ondes de surface pour les différents transducteurs augmente avec l'augmentation du rapport E/C, tout en notant une certaine fluctuation dans cette évolution contrairement à l'évolution de la vitesse. Ceci est lié à l'influence du rapport E/C sur la structure poreuse du béton (augmentation de la porosité et de la perméabilité), comme on le verra dans l'étude des corrélations entre l'atténuation, la porosité et la perméabilité. L'étude réalisée par Lafhaj et al [117] confirment ces résultats et montrent que l'atténuation est non seulement sensible à la porosité, mais aussi à un changement de microstructure dans le matériau lorsque le rapport E/C est supérieur à 0,45.

Les atténuations les plus importantes sont celles correspondant à la fréquence la plus importante (150 KHz). Comme le confirme Tarek Ibrahim [110] où il a obtenu une atténuation pour une fréquence de source de 3,5 MHz plus importante et plus sensible aux changements de microstructure que l'atténuation obtenue par une fréquence de 1MHz car la longueur d'onde est plus courte. Vergara et al [123] trouvent que le rapport E/C influe fortement sur le facteur d'amortissement avec des hautes fréquences sur des blocs de ciment ou de mortier dont le rapport E/C varie de 0,45 à 0,65. Par contre, des mesures similaires à plus basses fréquences montrent que les variations du facteur d'amortissement en fonction du rapport E/C sont plus faibles [141].

Les atténuations obtenues par les transducteurs d' ( $\varnothing 7.5$ ,  $f=54\text{Hz}$ ) représentent une augmentation moyenne de l'atténuation par rapport à celle obtenue par les transducteurs d ( $\varnothing 49.5$ ,  $f=54\text{Hz}$ ) de 18% pour les BO pour les trois premiers rapports E/C (E/C= 0.44, 0.52 et 0.55). Cette augmentation s'amplifie pour les BO fluides (E/C=0.60, 0.65 et 0.70) dépassant le double. Donc l'effet du diamètre sur l'atténuation est plus important dans le cas des bétons ordinaires fluides. Les BHP, de part leur faible rapport E/C, présentent des différences relativement faibles vis à vis du changement du diamètre.

#### **IV.2.5 Influence du type d'addition sur l'atténuation**

La figure VI.5 donne la variation de l'atténuation des ondes des ondes pour les deux BAP différenciés par le type de l'addition.



**Figure VI.5:** Influence du type d'addition sur l'atténuation des ondes de surface.

**Tableau IV.5:** Influence du type d'addition sur l'atténuation.

Transducteurs			Atténuation ( $10^{-1\text{db/m}}$ )	
Symbole	f (kHz)	D (mm)	BAP <sub>L</sub>	BAP <sub>F</sub>
d'	150	28.5	25.01 ± 11.10	24.78 ± 11.3
D	54	49.5	9.28 ± 0.78	11.17 ± 3.31
D'	25	49.5	16.78 ± 8.71	17.89 ± 0.6
d	54	7.5	14.95 ± 9.65	24.14 ± 1.72

Comme pour les précédents bétons, l'atténuation les importantes correspondent à la plus fréquence la plus importante pour le deux BAP. Le BAP à base de laitier a des atténuations plus faibles que celles des BAP à base de fillers calcaires. Selon Derabla [108], pour un taux d'addition de 20%, l'utilisation du laitier dans le béton vibré et le BAP est plus bénéfique pour la transmission des ondes ultrasonore que le filler calcaire. Néanmoins, il est un peu bénéfique avec une teneur de 40%. La plus importante différence (40%) correspond aux transducteurs de petit diamètre (**d**). L'effet du type de l'addition est négligeable pour la fréquence de 150 kHz (**d'**)

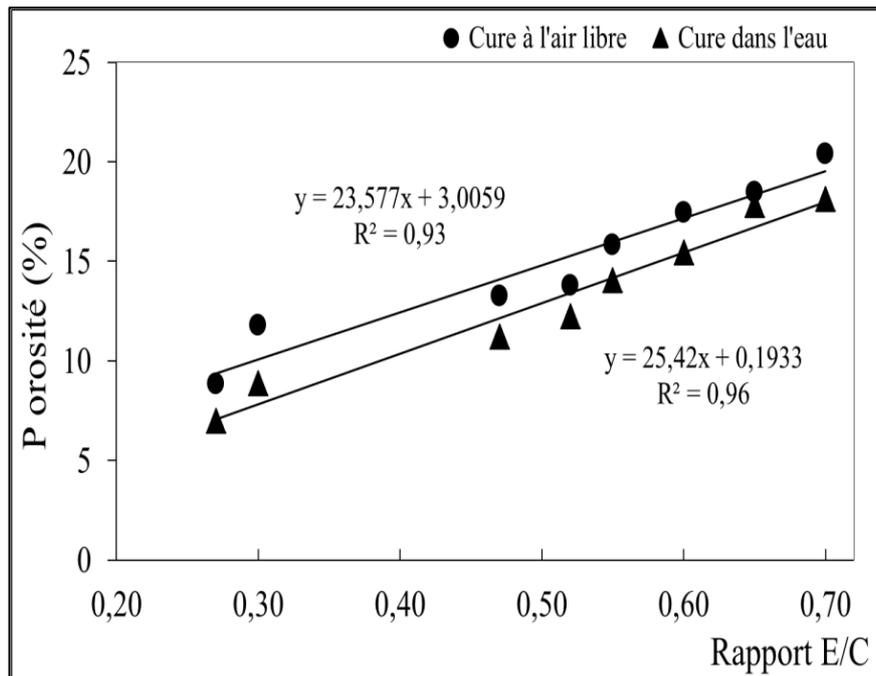
### IV.3 Porosité accessible à l'eau

#### IV.3.1 Influence du rapport E/C sur la porosité

Les résultats de la porosité des bétons ordinaires et à haute performance sont donnés dans le tableau IV.6. Comme prévu, l'illustration graphique des résultats représentés par la figure VI.6 montre que la porosité est une fonction croissante du rapport E/C. Autrement dit, plus le rapport E/C croît, plus la porosité augmente. A titre d'exemple l'augmentation du rapport E/C de 0,52 à 0,55 pour un béton ordinaire augmente la porosité d'environ 15%, ceci pour les deux types de cure. De plus, on remarque que les valeurs de la porosité vont de 7% et 9% pour le rapport E/C le plus bas à 18% et 20% pour le plus haut, respectivement pour la cure dans l'eau et la cure à l'air libre, cet accroissement est dû au départ de l'eau liée des hydrates de la pâte de ciment [142].

Selon Gagné et Aïtcin [146], plus le rapport E/C est faible, plus, initialement, les grains de ciment sont rapprochés les uns des autres. Les espaces à combler entre les grains de ciment sont moins grands et il y a moins de chance d'avoir un grand vide ne pouvant pas être complètement rempli par les hydrates. Aussi, l'utilisation d'une très grande quantité d'eau par rapport à la masse de ciment (E/C élevé), a pour conséquence l'éloignement des grains de ciment les uns des autres et, après leur hydratation complète, il restera un surplus d'eau important, donc, une porosité très importante. La diffusion du béton sera très grande et ses propriétés mécaniques seront très faibles. Inversement, si la quantité d'eau est très faible par rapport à la masse de ciment (E/C faible), les grains de ciment sont très proches les uns des autres. Toute l'eau pourra réagir avec le ciment et il ne restera que très peu de porosité. La diffusion du béton sera très faible et les propriétés du béton seront très élevées.

La relation entre la porosité totale et le rapport E/C est de type linéaire ( $R^2 \geq 0.93$ ) pour les deux modes de durcissement. Cette corrélation a été étudiée aussi par Marc Goueygou et al [143], qui indiquent une variation quasiment linéaire entre la porosité et le rapport E/C. Et lorsque le rapport E/C s'accroît de 0.3 à 0.6, la porosité augmente de 7% à 16%. Lafhaj [117], aussi montre que les valeurs de porosité vont de 8% pour le rapport E/C le plus bas (0.3) à 13,5% pour le plus élevé (0.6).



**Figure IV.6:** Influence du rapport E/C sur la porosité.

**Tableau IV.6:** Influence du rapport E/C sur la porosité

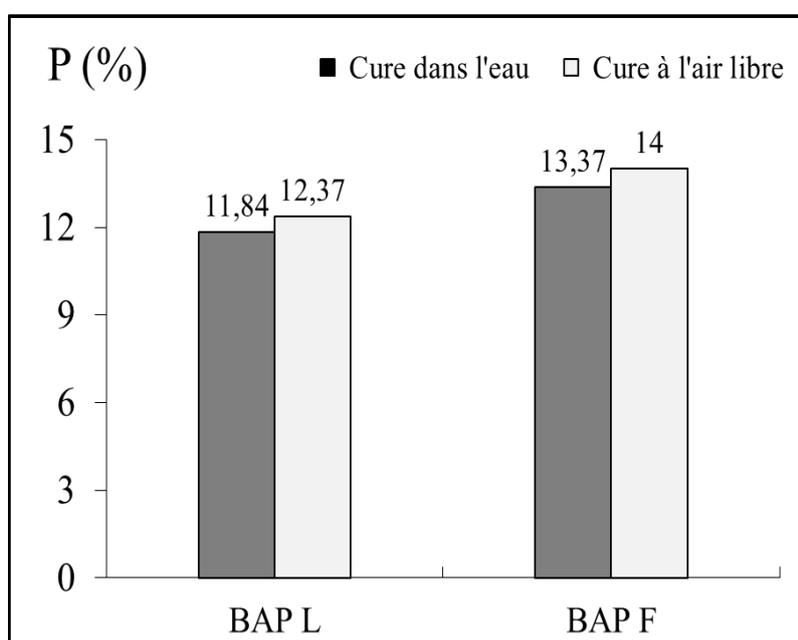
Porosité totale	BHP <sub>0,27</sub>	BHP <sub>0,30</sub>	BO <sub>0,47</sub>	BO <sub>0,52</sub>	BO <sub>0,55</sub>	BO <sub>0,60</sub>	BO <sub>0,65</sub>	BO <sub>0,70</sub>
Cure dans l'eau	6.97	8.89	11.21	12.23	14.04	15.44	17.84	18.13
Cure à l'air libre	8.82	11.78	13.26	13.79	15.82	17.44	18.47	20.39

### IV.3.2 Influence du type d'addition sur la porosité

La porosité de chaque BAP par rapport au type d'addition est représentée sur l'histogramme IV.7 Le BAP à base de laitier a une porosité plus faible que le BAP à base de fillers calcaires, cette différence est d'environ 13% pour les deux conditions de cure.

Derabla [108] montre que la nature de l'addition minérale joue un rôle prépondérant dans l'amélioration de la porosité. Les BAP à base de fillers calcaires sont plus poreux alors que les BAP à base des laitiers sont moins poreux, d'où l'importance de l'incorporation des additions fines réactives dans les BAP pour avoir des mélanges plus denses et plus serrées notamment si ces BAP ont subi une accélération de leurs durcissements par traitement thermique.

La contribution au remplissage des vides est autant plus importante que la quantité des fines est importante. Le laitier du haut fourneau est un matériau hydraulique latent, son hydratation procure une forte compacité du aux hydrates. On a ainsi une dimension moyenne des pores plus petite [134], l'ajout des fillers calcaires diminue beaucoup plus des pores capillaires de taille inférieurs à 5  $\mu\text{m}$  [135]. La porosité initiale est plus faible car la proportion volumique de solide est initialement plus importante à cause de l'ajout du filler calcaire. Hamami [136] a aussi constaté que l'ajout de fillers calcaires réduit la porosité mais qu'il est un élément inerte vis-à-vis de la porosité totale du matériau.



**Figure IV.7:** Influence du type d'adition sur la porosité.

**Tableau VI.7:** Influence du type d'adition sur la porosité

Porosité	BAP <sub>L</sub>	BAP <sub>F</sub>
Cure dans l'eau	11.84	13.37
Cure à l'air libre	12.37	14.00

### IV.3.3 Influence du mode de cure sur la porosité

Les résultats représentés sur les figures IV.6 et IV.7 montrent clairement l'effet bénéfique de la cure humide sur la réduction de la porosité des bétons utilisés dans cette étude. La cure

humide favorise l'hydratation qui a pour effet de colmater les pores capillaires existants et renforcer les liaisons inter-granulaires [111-112].

A titre d'exemples dans la figure IV.5 on observe nettement l'influence de la cure humide sur la diminution de la porosité totale par une moyenne de 16%, et pour la figure IV.6 on remarque une diminution d'environ 13% pour les deux BAP.

Ceci signifie que les bétons conservés à l'air libre sont plus poreux car après démoulage et en l'absence de durcissement, le béton d'enrobage perd rapidement son eau d'hydratation par séchage.

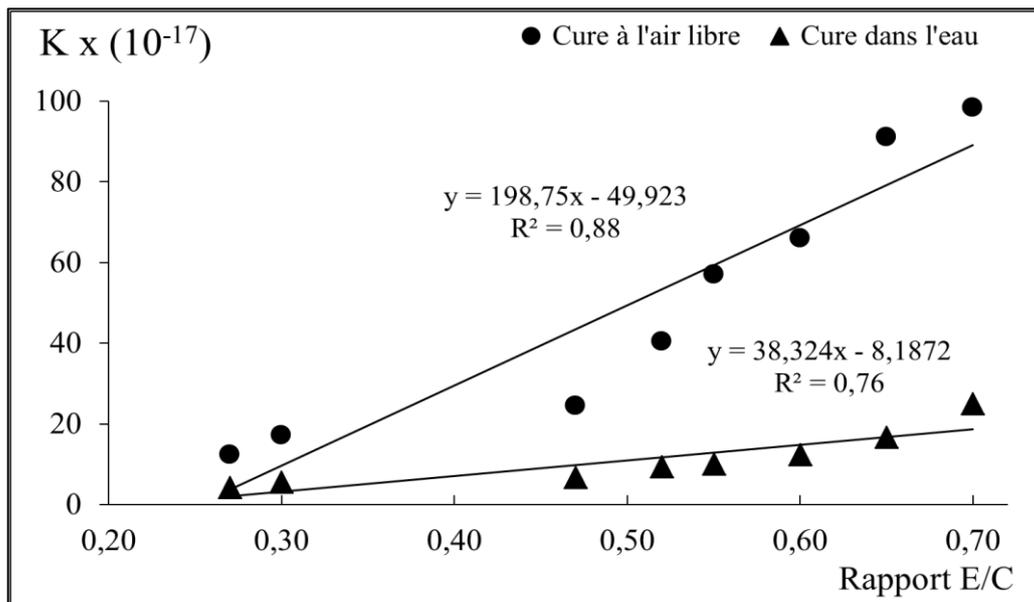
#### **IV.4 Perméabilité aux gaz**

##### **IV.4.1 Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'air**

Les résultats de la perméabilité intrinsèque des bétons ordinaires et à hautes performances sont donnés dans le tableau IV.8. L'illustration graphique des résultats représentés par la figure VI.8 montre que la perméabilité à l'air est une fonction croissante du rapport E/C. Autrement dit, plus le rapport E/C croît, plus la perméabilité à l'air augmente.

A titre d'exemple l'augmentation du rapport E/C de 0,47 à 0,70 pour un béton ordinaire conduit à une augmentation de près de quatre fois de la perméabilité à l'air pour les deux modes de cure. L'augmentation du rapport E/C de 0,27 à 0,30 pour un béton à haute performance mène à une augmentation de la perméabilité à l'air de 39% et 33% respectivement pour la cure à l'air libre et dans l'eau, cette différence n'est pas visible en terme de résistance où la différence n'excède pas 14%. Ces résultats sont cohérents avec ceux donnés par [43, 144].

La relation entre la perméabilité à l'air et le rapport E/C n'est évidemment pas linéaire dans les deux modes de durcissement. Cette relation est plus fiable pour le mode cure dans l'eau, il peut être justifié par l'effet de la cure humide sur la réduction de la porosité donc la perméabilité par l'obturation des pores dû à l'hydratation continue du ciment dans l'eau [104]. La perméabilité au gaz augmente avec le séchage du matériau, dans les réseaux de pores fortement saturés, la perméabilité au gaz devient nulle. Ceci aura par conséquent d'empêcher l'accessibilité d'un certain volume poreux au gaz [117, 137].



**Figure IV.8:** Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'air.

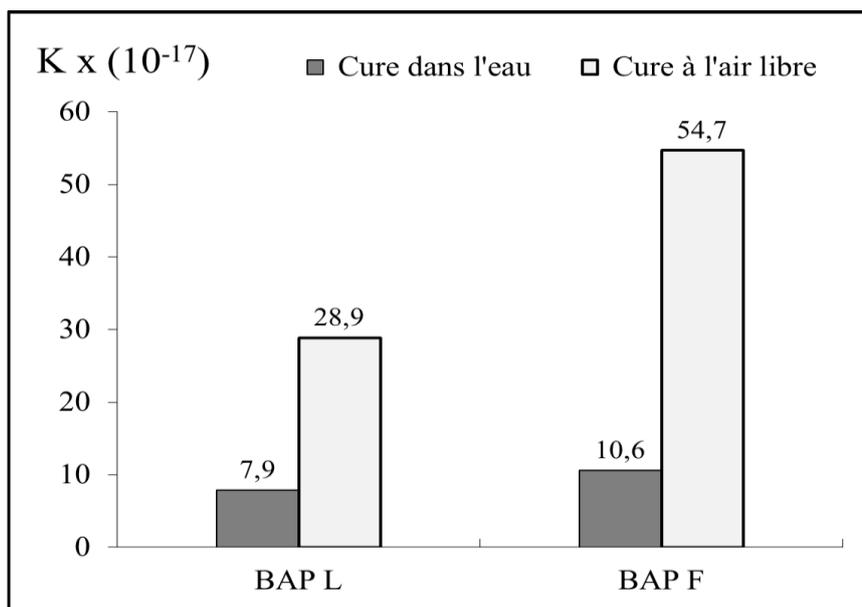
**Tableau IV.8:** Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'air.

K (10 <sup>-17</sup> )	BHP <sub>0.27</sub>	BHP <sub>0.30</sub>	BO <sub>0.47</sub>	BO <sub>0.52</sub>	BO <sub>0.55</sub>	BO <sub>0.60</sub>	BO <sub>0.65</sub>	BO <sub>0.70</sub>
Cure dans l'eau	4.2	5.6	6.8	9.4	10	12.4	16.7	25
Cure à l'air libre	12.46	17.27	24.5	40.5	57	66.1	91.2	98.5

#### IV.4.2 Influence du type d'addition sur la perméabilité à l'air

L'évolution de la perméabilité à l'air des deux BAP en fonction du type d'addition est représentée sur la figure IV.9. On observe que le BAP à base de fillers calcaires a une perméabilité à l'air plus importante que le BAP à base de laitier, cette différence est d'environ 34% et 89% respectivement pour la cure dans l'eau et à l'air libre.

De plus, et en comparaison de l'évolution de la perméabilité à l'air et de la porosité en fonction du type d'addition on remarque que la perméabilité à l'air est de l'ordre de 3 fois et de 7 fois supérieur à celle de la porosité, respectivement pour la cure dans l'eau et la cure à l'air libre, donc la porosité accessible à l'eau n'est pas, à elle seule, un facteur déterminant de la perméabilité, mais il faut aussi prendre en considération d'autres facteurs comme le réseaux poreux (taille des pores et connectivité) . Ou encore la viscosité dynamique du gaz utilisé dans ces essais.



**Figure IV.9:** Influence du type d'addition sur la perméabilité à l'air.

#### IV.4.3 Influence du mode de cure sur la perméabilité à l'air

Les résultats représentés sur les figures IV.8 et IV.9 mettent en évidence l'effet positif de la cure humide sur la diminution de la perméabilité à l'air des différents bétons utilisés. Pour les résultats donnés par figure IV.7 on remarque que la cure humide diminue la perméabilité à l'air avec une moyenne de 67% pour les BAP et de 78% pour les BO. Aussi on observe pour le mode cure à l'air libre que les bétons de faible rapport E/C (0.27 jusqu'à 0.55) ont un accroissement d'environ 47%, par contre les autres rapports E/C (0.60 jusqu'à 0.70) ont un accroissement qui n'excède pas 21%, ces deux observations sont liées directement à l'effet de la porosité dans le mode de cure à l'air libre où cette dernière augmente de 16% pour les faibles rapports E/C et de 8% pour les rapports E/C variant de 0.60 à 0.70.

Par contre pour le mode de cure dans l'eau, l'accroissement de la perméabilité à l'air pour les bétons de rapport E/C variant de 0.27 à 0.55 est d'environ 25% et pour les rapports E/C variant de 0.60 à 0.70 l'accroissement est d'environ 42%, cette observation n'est pas vue en terme de porosité où elle augmente de 19% et 9% respectivement pour les rapports E/C (0.27 à 0.55) et E/C (0.60 à 0.70), ceci peut indiquer que la cure humide conduit à une diminution de la densité des plus gros pores due à l'hydratation croissante du ciment [111, 113]. 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 [138].

La figure IV.9 met en évidence l'effet bénéfique de la cure humide sur la réduction de la perméabilité à l'air, cette diminution est de l'ordre de 67% et 81% respectivement pour le BAPL et BAPF.

#### **IV.5 Perméabilité à l'eau (profondeur de pénétration d'eau)**

##### **IV.5.1 Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau**

La perméabilité du béton est un indicateur important de durabilité. Elle est augmentée par l'interconnexion du chemin d'écoulement entre les pores du béton. Ceci conduit à la progression des produits chimiques agressifs et d'eau qui provoquent une détérioration du béton.

Les résultats d'essais de perméabilité à l'eau sont donnés dans le tableau IV.9 et représentés sur la figure IV.10. En général, la perméabilité à l'eau augmente avec l'augmentation du rapport E/C. Le taux d'accroissement pour les bétons conservés dans l'eau est de 71 % et 31% respectivement pour les BHP et les BO. Pour les bétons conservés à l'air libre le taux d'accroissement est de 31% pour les BHP et n'est que de 2% pour les BO, la raison de la petite augmentation des BO conservés à l'air libre est expliquée par la pénétration importante d'eau pour la majorité des rapports E/C. Cette pénétration d'eau atteint la hauteur maximale de l'éprouvette (15cm) surtout pour les rapports E/C variant de 0.55 à 0.70. L'augmentation de la perméabilité est attribuée aussi à l'augmentation de la porosité avec l'augmentation des rapports E/C. Ce résultat est proche d'autres données de la littérature [119, 147]. On remarque aussi pour les différents bétons conservés dans l'eau que la profondeur de pénétration d'eau reste toujours inférieure à la valeur maximale admissible pour les bétons imperméables (5 cm). Les BHP, pour les deux modes de cure, se présentent comme des bétons imperméables, ceci est dû à l'addition de la fumée de silice qui fortement améliore cet aspect. Khayat et Aitcin [76] ont signalé qu'une teneur de 5% de fumée de silice réduit le coefficient de perméabilité dans le rapport de 1 et 3. Ainsi, l'influence bénéfique de la fumée de silice est donc plus importante sur la perméabilité que sur la résistance à la compression. La relation entre la perméabilité à l'eau et le rapport E/C n'est pas évidemment linéaire. Car le coefficient de corrélation ( $R^2 < 0.90$ ) pour les deux modes de cure. Bien sûr, plus le rapport E/C est important, plus il y a de pores mais ce qui contrôle la perméabilité du béton est plus la connectivité du réseau de pores que le volume directement [139].

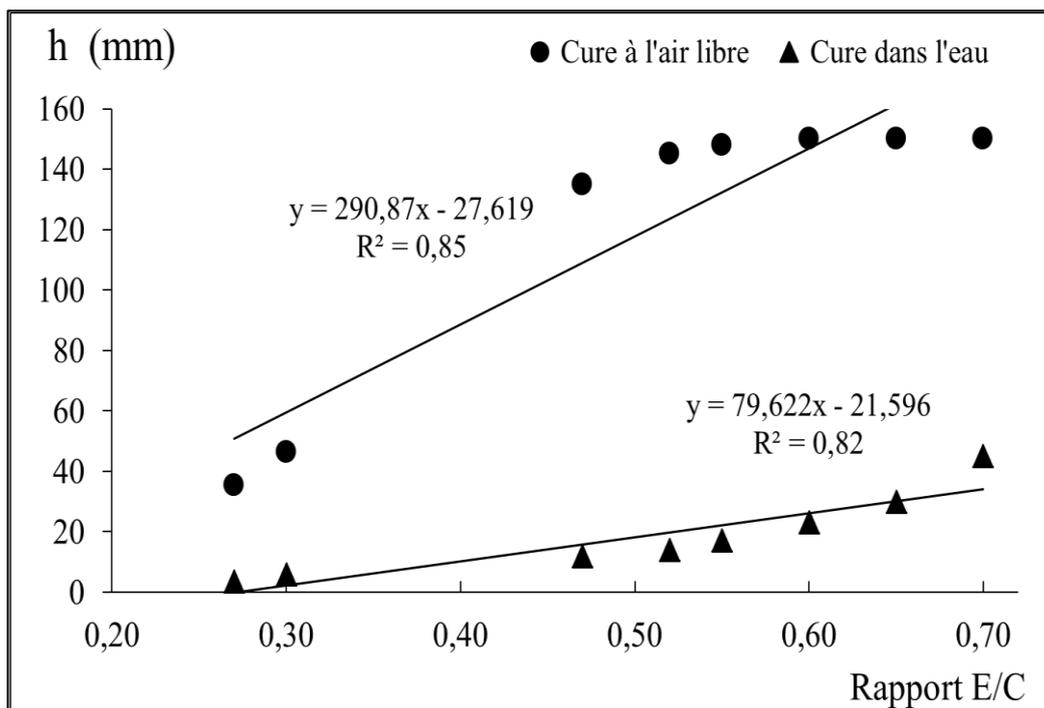


Figure IV.10: Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau.

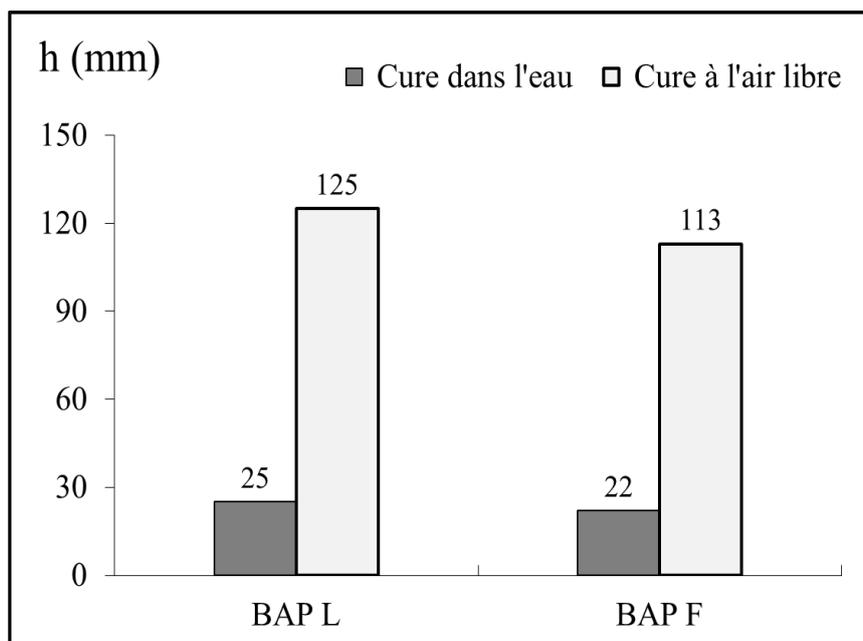
Tableau IV.9: Influence du rapport E/C sur la perméabilité à l'eau.

Perméabilité à l'eau h (mm)	BHP <sub>0.27</sub>	BHP <sub>0.30</sub>	BO <sub>0.47</sub>	BO <sub>0.52</sub>	BO <sub>0.55</sub>	BO <sub>0.60</sub>	BO <sub>0.65</sub>	BO <sub>0.70</sub>
Cure dans l'eau	3.5	6	12	14	17	23	30	45
Cure à l'air libre	35.5	46.5	135	145	148	150	150	150

IV.5.2 Influence du type d'addition sur la perméabilité à l'eau

L'évolution de la perméabilité à l'eau des deux BAP en fonction du type d'adition est représentée sur la figure IV.11. On observe que le BAP à base de laitier a une perméabilité à l'eau légèrement supérieure à celle du BAP à base de fillers calcaires, cette différence est d'environ 14% et 11% respectivement pour la cure dans l'eau et la cure à l'air libre. Cette évolution de la perméabilité à l'eau en fonction du type d'adition est inversement à celle de la

porosité, de la perméabilité à l'air et de la résistance à la compression, Cela peut être expliqué par l'effet du laitier, car le laitier absorbe l'eau et le superplastifiant par conséquent la diminution du seuil de la viscosité de mélange, aussi le laitier est considéré comme une adition minérale chimiquement active [114, 115, 116]. Il a une réactivité pouzzolanique alors que les fillers calcaires sont inertes et ne réagissent pas en présence d'eau. Derabla [108] relèvent pour des BAP à base de laitier dans des conditions de durcissement normales, que la porosité augmente considérablement avec l'accroissement de laitier car une quantité d'eau encore plus importante est absorbée par le laitier ce qui provoque un mauvais déroulement de la réaction d'hydratation du ciment. Des études Ferraris [150] et Khayat [151] montrent que l'ajout du laitier de hauts fourneaux en substitution du ciment, permet globalement de réduire le seuil de cisaillement et la viscosité plastique des pâtes de ciment. D'autres travaux de Shi et al [114] indiquent que les laitiers adsorbent le superplastifiant, ce qui se traduit par une demande en superplastifiant plus importante pour obtenir un même étalement ou valeur de seuil de cisaillement. Gallias et al [148] et Elhilali [149], rapportent que le filler calcaire se caractérise par de faibles besoins en eau par rapport au ciment. En effet, son utilisation influence peu la demande en eau et peut conduire à une légère diminution de la viscosité du mélange cimentaire.



**Figure IV.11:** Influence du type d'addition sur la perméabilité à l'eau.

### IV.5.3 Influence du mode de cure sur la perméabilité à l'eau

Comme prévu, les résultats représentés sur les figures IV.10 et IV.11 illustrent l'effet positif de la cure humide sur la diminution de la perméabilité à l'eau de différents bétons utilisés pour les deux modes de cure.

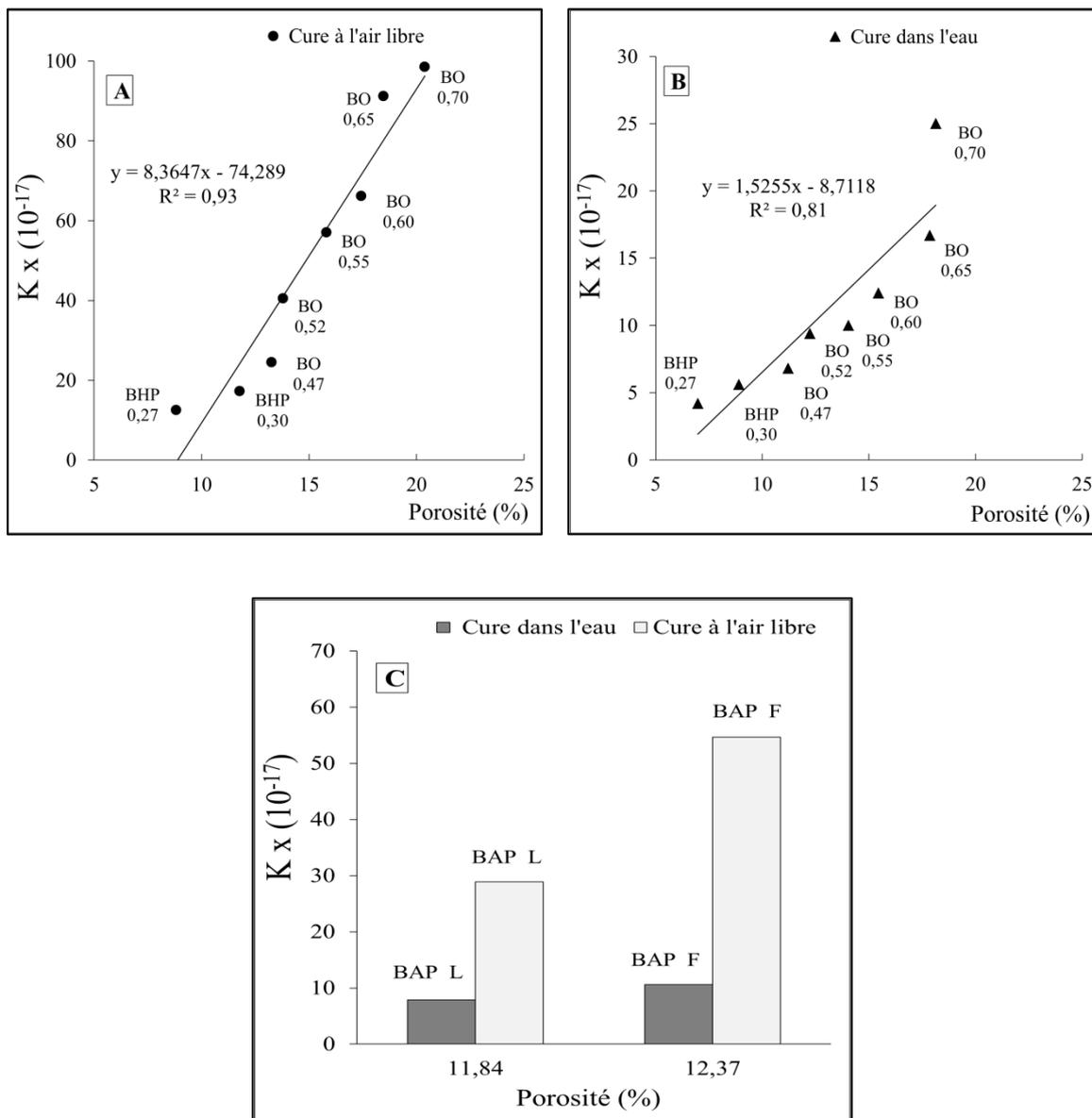
A travers les résultats donnés par la figure IV.10, on remarque que la cure humide mène à une diminution importante de la perméabilité à l'eau de l'ordre de 85%. La cure à l'air libre affecte négativement la perméabilité à l'eau dans les bétons ordinaires où la pénétration d'eau atteint la hauteur totale de l'éprouvette pour la majorité des BO. La cure humide améliore la relation entre la perméabilité à l'eau et le rapport E/C.

On observe (fig. IV.11) que les deux BAP sont aussi affectés par la cure à l'air libre comme les BO et deviennent des bétons perméables ( $h > 50$  mm). La cure humide diminue la perméabilité à l'eau d'environ 80% pour les deux BAP.

Donc la saturation des bétons dans la cure dans l'eau fournit une rigidité supplémentaire [117, 118].

### IV.6 Evolution de la perméabilité à l'air en fonction de la porosité

Les résultats reportés sur la figure IV.12 présentent les valeurs de perméabilité à l'air en fonction de la porosité pour les différents échantillons de béton (BHP, BO et BAP) conservés dans l'eau et à l'air libre. La dépendance de la perméabilité à la porosité est très significative. Autrement dit, plus la porosité croît, plus la perméabilité à l'air augmente, cette dernière est valable pour les deux modes de cure. A titre d'exemple pour les BHP la perméabilité à l'air augmente de 39% et 33% lorsque la porosité augmente de 28% et 34% respectivement pour le mode cure à l'air libre et dans l'eau. Pour les BO, l'augmentation de 15% de la porosité dans les deux modes de cure, correspond à l'augmentation de la perméabilité à l'air de 41% et 6% respectivement pour le mode cure à l'air libre et dans l'eau (figures IV.12.A et B). La porosité du BAP avec les fillers calcaires est de 13% supérieure à celle du BAP avec du laitier dans les deux modes de cure (figure IV.12.C), cette augmentation a conduit à un accroissement de la perméabilité à l'air de 34% et 89% respectivement pour le mode de cure à l'air libre et dans l'eau. La cure humide influe positivement sur la porosité et par conséquent la réduction de la perméabilité. On conclure par ces résultats que la relation entre la perméabilité à l'air et la porosité semble naturelle, sachant que la perméabilité ne dépend pas seulement de la porosité mais aussi de la tortuosité, de la distribution, de la taille des pores et de la connectivité des pores [145].



**Figure IV.12:** Variation de la perméabilité à l'air avec la porosité. A) cure à l'air libre «BHP et BO», B) cure dans l'eau «BHP et BO», C) les deux modes de cure «BAP»

**IV.7 Evolution de la perméabilité à l'eau en fonction de la porosité**

Les figures IV.13.A, IV.13.B et IV.13.C montrent l'évolution de la perméabilité à l'eau en fonction de la porosité pour les différents échantillons de béton (BO, BHP et BAP) conservés dans l'eau et à l'air libre. Les BHP ont une variation de la perméabilité à l'eau en fonction de la porosité similaire à celle de la perméabilité à l'air. La perméabilité à l'eau des BO croit avec l'accroissement de la porosité, sachant pour la cure à l'air libre toutes les valeurs de la porosité correspondent à des bétons perméables où la profondeur de pénétration d'eau (h) dépasse deux fois la valeur maximale admissible des bétons imperméables (50 mm). A titre d'exemple pour une porosité supérieur à 15% la profondeur de pénétration d'eau (h) atteint la

hauteur totale de l'éprouvette du test, ceci peut être expliqué par l'évaporation d'eau existante dans les pores accessible. Pour la cure dans l'eau la plus grande valeur de la porosité (20.39%) des BO correspondent à une hauteur de pénétration de l'eau à 45 mm, ceci est dû à la saturation du matériau béton par l'eau. La figure IV.13.C illustre que l'évolution de la perméabilité à l'eau des BAP en fonction de la nature de l'ajout est inversement proportionnelle à l'évolution de la porosité. Dans les deux modes de cure le BAP<sub>L</sub> a une porosité inférieure à celle du BAP<sub>F</sub> par contre la perméabilité à l'eau du BAP<sub>L</sub> est supérieure à celle BAP<sub>F</sub>. Cela signifie que la perméabilité ne dépend pas seulement de la porosité mais aussi aux caractéristique physico-chimiques des constituants du béton et d'autres facteurs comme les dimensions des pores.

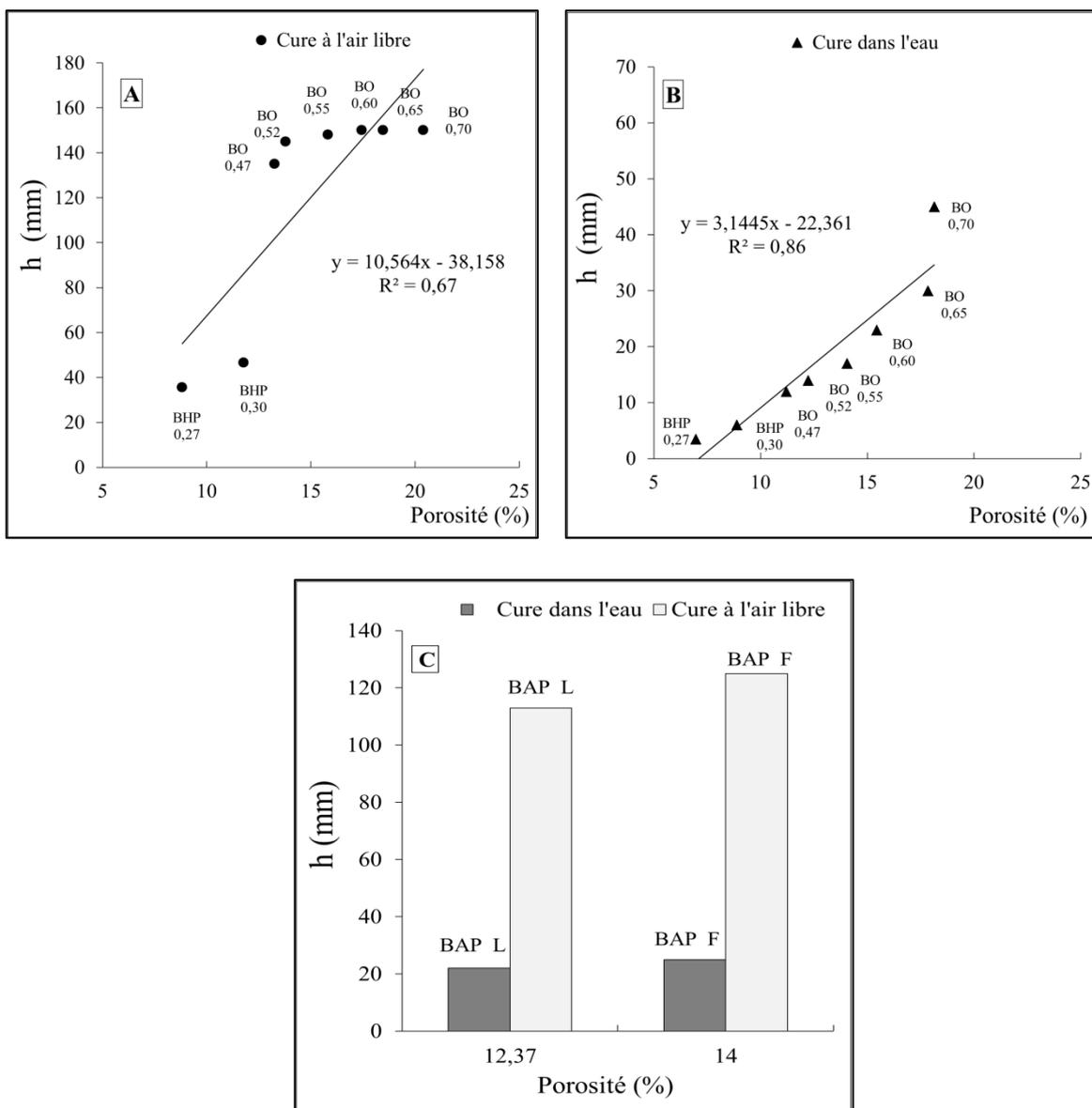


Figure IV.13: Variation de la perméabilité à l'eau avec la porosité. A) cure à l'air libre «BO et BHP», B) cure dans l'eau «BO et BHP», C) les deux modes de cure «BAP»

#### IV.8 Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la porosité

La figure IV.14 montre la variation des vitesses ultrasoniques indirectes en fonction de la porosité des bétons ordinaires conservés à l'air libre et dans l'eau. On remarque que l'accroissement de la porosité conduit à une diminution de la vitesse ultrasonore, ceci est observé pour les deux modes de cure. Pour les différents transducteurs une régression linéaire est effectuée sur les corrélations entre la vitesse ultrasonore et la porosité [117,122, 123, 152]. Les transducteurs «d', D et D'» conduisent à de meilleures corrélations, alors que les corrélations correspondant aux transducteurs "d" sont moins précises.

Cette corrélation est beaucoup moins précise avec l'utilisation des transducteurs « d ». L'angle de réflexion de ces transducteurs est plus important que celui des autres transducteurs, donc les ondes ultrasonores sont beaucoup plus réfléchies et par conséquent elles sont moins transmises dans le matériau béton. Cette dispersion est plus accentuée pour une conservation des bétons à l'air libre car ce mode de cure augmente la taille des pores et la porosité [118], ces derniers permis l'augmentation de l'hétérogénéité du béton donc une diffraction élevée des ondes ultrasonores. Au vu des coefficients de corrélation « R<sup>2</sup>» de toutes les courbes, on remarque que la cure humide affecte positivement la corrélation vitesse-porosité [117, 126, 143].

On observe que la valeur la plus élevée de la vitesse correspond à la plus faible valeur de la porosité, ceci est remarqué pour les quatre différents transducteurs. L'évolution de la porosité de 10% dans les deux modes de cure (E/C varie de 0.52 à 0.55) conduit à une diminution de la vitesse de 6, 5, 6 et 4% respectivement pour les transducteurs «d', D, D' et d», aussi quand la porosité augmente de 26% (E/C varie de 0.52 à 0.60) dans les deux modes de cure la vitesse diminue de 16, 11, 14 et 8% respectivement pour les transducteurs «d', D, D' et d», donc on remarque par ces deux exemples que les transmissions par les transducteurs «d', D et D'» sont plus sensibles à la variation de la structure du béton. Ces transducteurs ont respectivement une fréquence de 150, 54 et 25Khz.

La figure IV.15 montre la variation de la vitesse en fonction de la porosité pour les deux BHP, on remarque pour les deux modes de cure que la vitesse diminue avec l'accroissement de la porosité. La diminution de la vitesse acquise par les transducteurs « D, D' et d » est relativement faible (moins de 5%). Les transducteurs «d'» donnent une diminution de 15%, pour une augmentation de la porosité d'environ 30% pour les deux modes de cure.

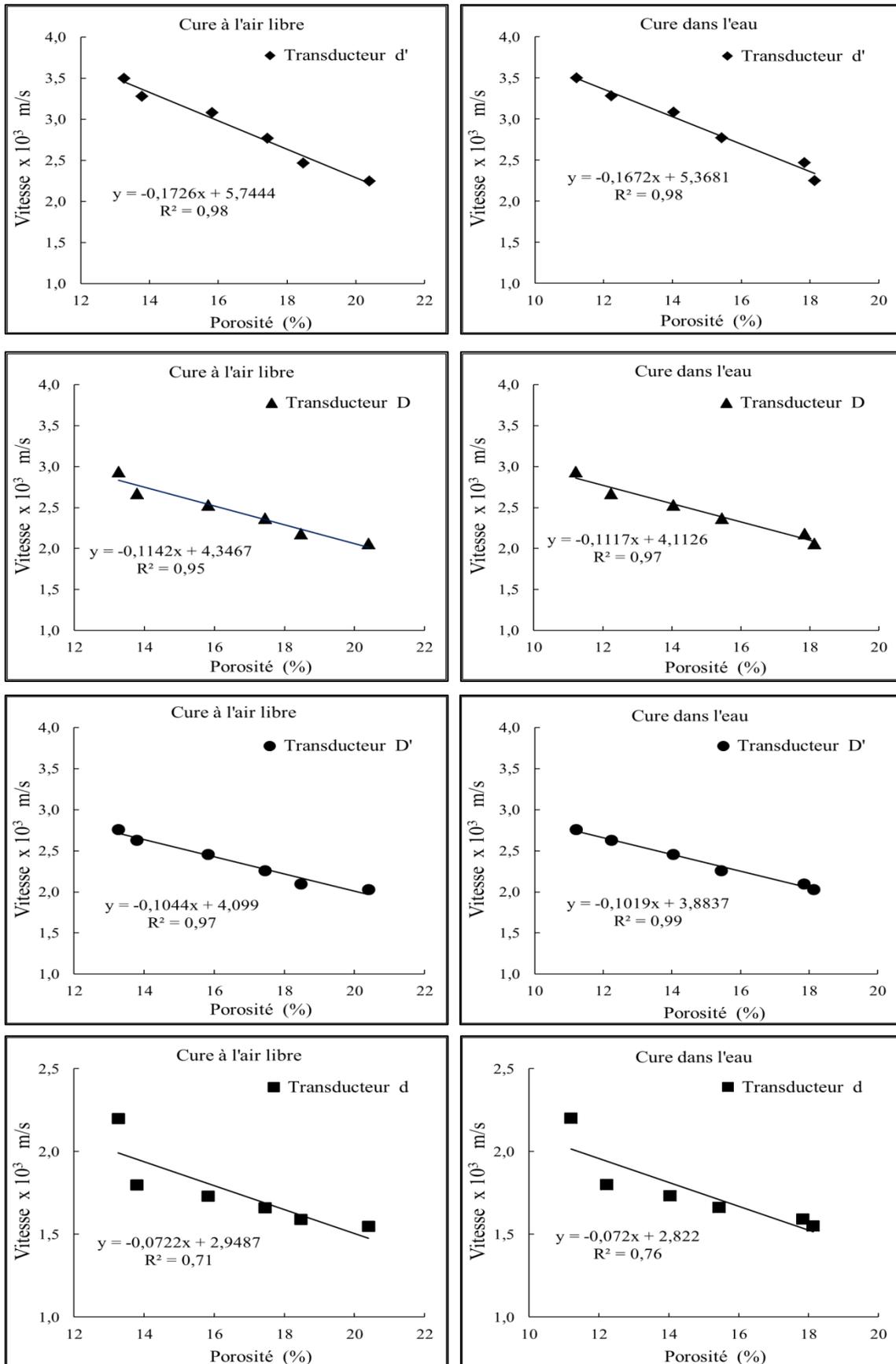


Figure IV.14: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la porosité pour les BO.

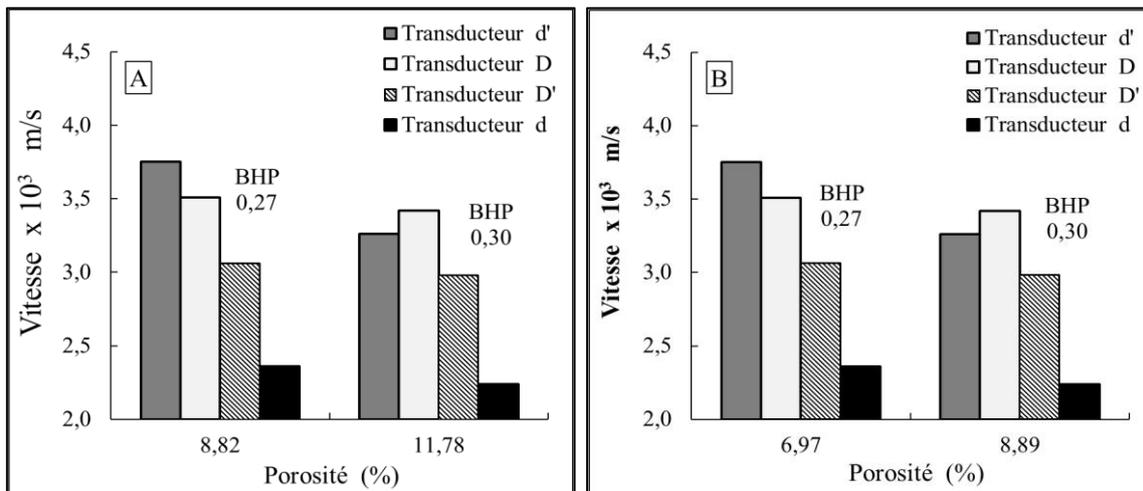


Figure IV.15: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la porosité pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau

Pour les bétons autoplaçants, la variation de la vitesse ultrasonore en fonction de la porosité est présentée par la figure IV.16. Nous observons que la vitesse décroît avec l'accroissement de la porosité, ce décroissement de la vitesse est bien remarqué par le transducteur «d». L'augmentation de la porosité de 13% du BAP filler par rapport à celle du BAP laitier pour les deux modes de cure conduit à une diminution de la vitesse ultrasonore d'environ 8% pour les différents transducteurs.

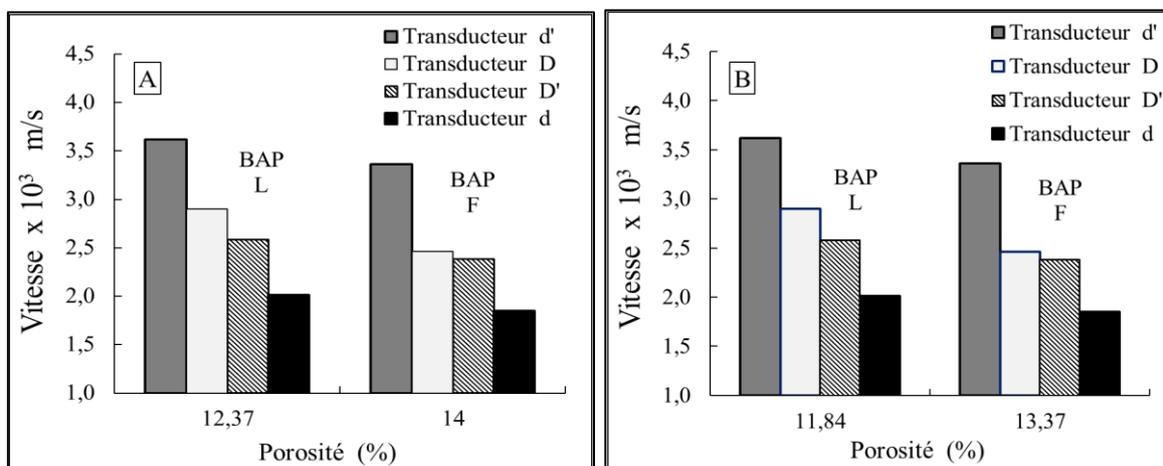


Figure IV.16: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la porosité pour les BAP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

#### IV.9 Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air

Les différentes courbes de la figure IV.17 présentent la variation de la vitesse ultrasonore en fonction de la perméabilité à l'air pour les bétons ordinaires. Les quatre différents transducteurs montrent dans les deux modes de conservation que l'augmentation de la perméabilité à l'air conduit à une diminution de la vitesse. Les régressions entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air sont de type linéaire. Ces résultats confirment ceux

obtenus par d'autres chercheurs [46, 122, 123, 152]. Les régressions sont moins précises pour une conservation dans l'eau des bétons car la teneur en eau du matériau influence beaucoup la perméabilité [119-121, 157], autrement dit que l'écoulement de l'air de test dans les éprouvettes du béton est plus important pour une porosité non saturé. Vincent [155] a reporté que le mode de séchage et le degré de saturation de l'éprouvette ont une influence directe sur la perméabilité au gaz des bétons, celle-ci diminue avec le degré de saturation du béton. La plus faible valeur de la perméabilité à l'air a présenté la plus valeur importante de la vitesse, ceci est observé par les quatre différents transducteurs dans les deux modes de cure. L'augmentation de la fréquence des transducteurs améliore la corrélation entre la vitesse et la perméabilité à l'air surtout pour une conservation dans l'eau des bétons. Pour ce dernier mode, on remarque que l'augmentation de la perméabilité à l'air de 32% pour les bétons de rapport E/C < 0.60 se reflète par une diminution de la vitesse de 12, 14, 11 et 21% obtenues respectivement par les transducteurs «d', D, D' et d », par contre pour les bétons fluides (E/C > 0.60) une augmentation de 33% de la perméabilité à l'air conduit à une diminution de la vitesse de 9, 6, 3 et 3%. Ceci peut être justifié par l'effet de la variation de la porosité où elle est de 16% pour les premiers bétons et n'est que de 9% dans les bétons fluides pour le même mode de conservation. Selon Ohdaira et Masuzawa [122] et Vergara et al [123], la dépendance de la perméabilité à la porosité et à la teneur en eau est très significative. En effet, la perméabilité ne dépend pas seulement de la porosité mais aussi de la tortuosité, de la surface spécifique, de la distribution de la taille des pores et de la connectivité des pores.

Pour les deux BHP les courbes de la figure IV.18 présentent la variation de la vitesse ultrasonore en fonction de la perméabilité à l'air. Nous notons que la vitesse s'affaiblit avec l'accroissement de la perméabilité à l'air, cette variation est similaire à celle observée pour la relation entre la porosité et la vitesse ultrasonore, où une augmentation de la perméabilité à l'air de 39 et 33% respectivement pour la cure à l'air libre et dans l'eau a conduit à une diminution de la vitesse de 15, 3, 3 et 5% obtenue respectivement par les transducteurs «d', D, D' et d». Les transducteurs «d» ont une sensibilité pour la variation de la perméabilité à l'air mieux que les autres transducteurs. L'utilisation des deux BHP seulement ne permet pas d'en tirer des conclusions sur des courbes de régression à deux points

La figure IV.19 montre les relations entre la perméabilité à l'air et la vitesse ultrasonore pour les deux BAP. Nous remarquons que le BAP au laitier a présenté une perméabilité à l'air inférieure à celle du BAP aux fillers. Cette diminution est de 47% et 25% respectivement pour la cure à l'air libre et dans l'eau. Ces diminutions correspondent à des augmentations des vitesses ultrasoniques de 7, 15, 8 et 8% obtenues respectivement par les transducteurs « d', D, D' et d».

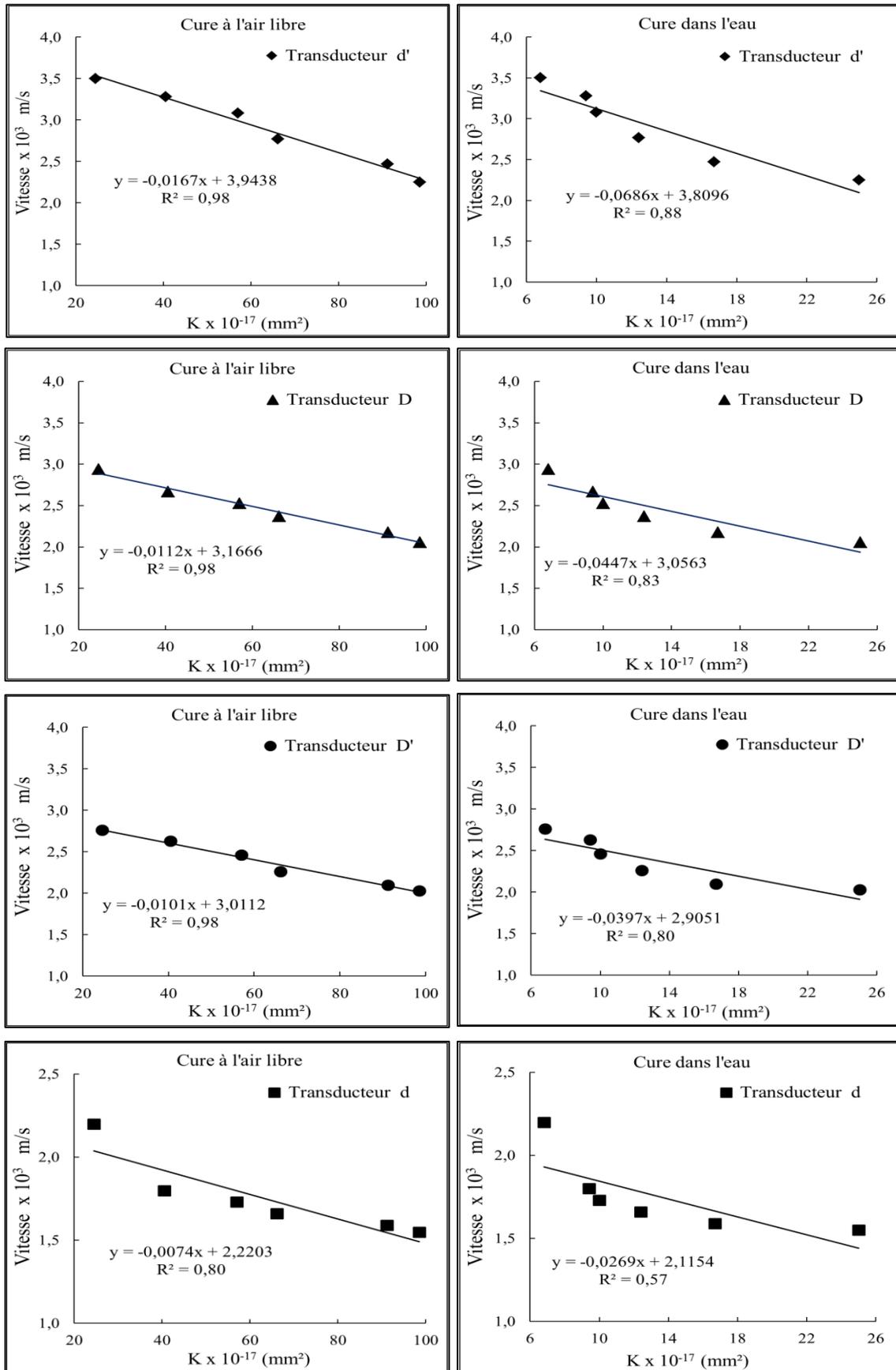


Figure IV.17: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BO.

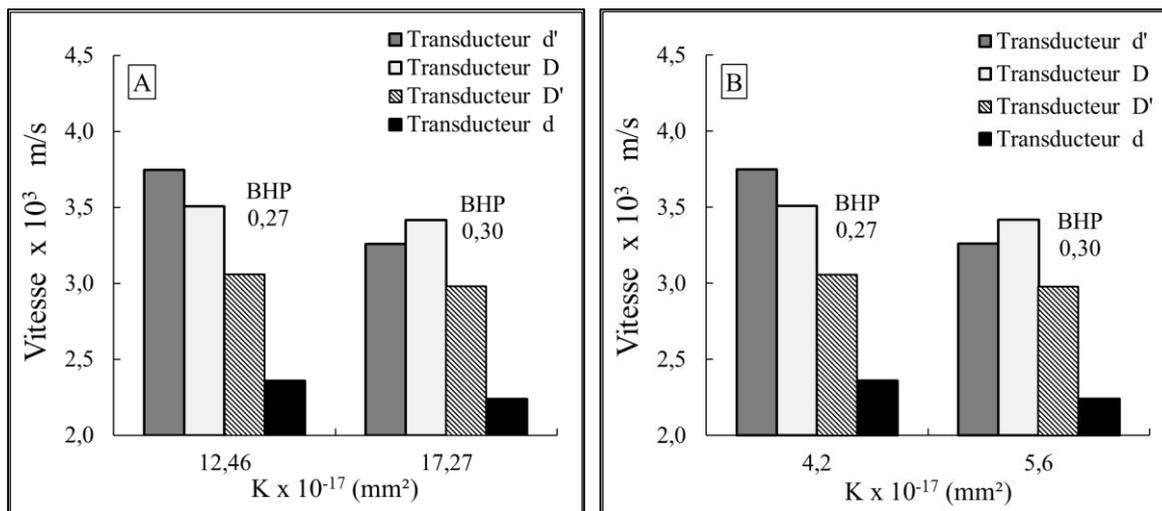


Figure IV.18: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

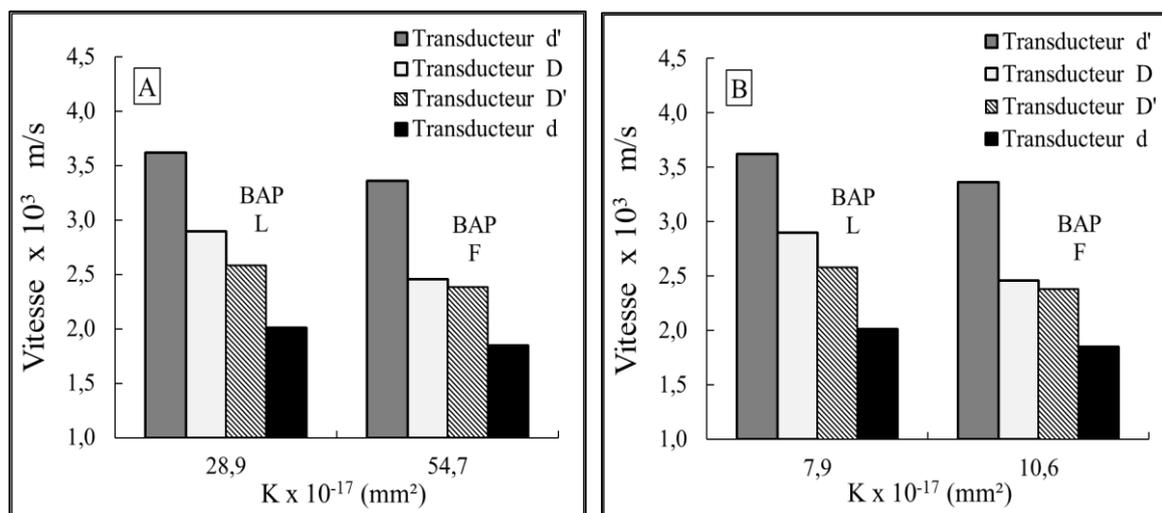


Figure IV.19: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BAP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

#### IV.10 Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'eau

La vitesse ultrasonore décroît avec l'accroissement de la perméabilité à l'eau (figure IV.20), ceci est observé par les différents transducteurs pour les deux états de conservation. Les corrélations vitesse-perméabilité à l'eau sont de type linéaire. La cure dans l'eau améliore les corrélations parce que dans ce mode les bétons sont de type imperméable (pénétration d'eau < 50 mm) ainsi que la teneur en eau influence la perméabilité et la vitesse ultrasonore, par contre pour le mode cure à l'air libre les corrélations deviennent moins précises car les bétons sont de type perméable surtout pour des rapports (E/C > 0.52) la perméabilité à l'eau est de

l'ordre de 100%. Yascioglu et al. [140], ont montré que les éprouvettes de béton donnent les meilleurs résultats de l'UPV à tous les âges après durcissement dans l'eau à 20°C, comparativement aux éprouvettes scellés (pour prévenir la perte d'humidité) ou à l'air. Aussi les résultats obtenus par Tanyidizi [158], indiquent que les valeurs de résistance à la compression et de vitesse d'impulsion ultrasonique les plus élevées sont obtenues à partir d'échantillons durcis à l'eau suivis de spécimens scellés et durcis à l'air indépendamment des types de béton.

Nous remarquons aussi respectivement pour le mode cure à l'air libre et dans l'eau une augmentation de la perméabilité à l'eau de 7% et 14% pour les bétons de rapport E/C < 0.55 et qui se traduit par une diminution de la vitesse de 7, 10, 5 et 22% respectivement pour les transducteurs «d', D, D' et d», par contre pour les bétons plus fluides (E/C > 0.55) une augmentation de la perméabilité à l'eau respectivement pour les bétons conservés à l'air libre et dans l'eau de 100% et 33% conduit à une diminution de 9, 6, 3 et 3% des vitesses données par les transducteurs « d', D, D' et d», ces résultats sont presque similaires à celles données par les relation vitesse-perméabilité à l'air. Les résultats obtenus par Hakan et al [156] indiquent que l'augmentation de la teneur en eau augmente presque linéairement la vitesse ultrasonore. Une augmentation supplémentaire de la teneur en eau de 1% augmente la vitesse d'environ 160 m/s en moyenne. En tant qu'évaluation globale, l'étude démontre que l'UPV est une fonction de la teneur en eau, et le changement de ce paramètre a une influence importante sur la vitesse d'impulsion ultrasonique du béton, comme indiqué aussi par d'autres travaux [49, 117, 118, 157].

Les résultats donnés par la relation vitesse-perméabilité à l'eau pour les deux BHP (figure IV.21) montre une similarité avec la relation vitesse-perméabilité à l'air, ceci pour les deux modes de cure. Par exemple un accroissement de la perméabilité à l'eau de 31 et 71% respectivement pour les bétons conservés à l'air libre et dans l'eau se traduit par un décroissement de 15, 3, 3 et 5% respectivement pour les transducteurs « d', D, D' et d».

Concernant la corrélation vitesse-perméabilité à l'eau pour les deux BAP, on observe (fig. IV.22) que l'augmentation de la perméabilité à l'eau mène à une légère augmentation de la vitesse. L'augmentation de la perméabilité à l'eau du BAP(F) au BAP(L) est 10% et 13% respectivement à l'air libre et à cure saturée. A cette augmentation de la perméabilité correspond une augmentation des vitesses ultrasoniques de 7, 15, 8 et 8% respectivement pour les transducteurs « d', D, D' et d». Cette proportionnalité entre ces deux paramètres semble due à des incertitudes des mesures de cette perméabilité (13% de différence au maximum) qu'à une vraie proportionnalité. Il semble que la nature des deux additions utilisées (laitier, fillers calcaires) ont peu d'influence sur la perméabilité à l'eau

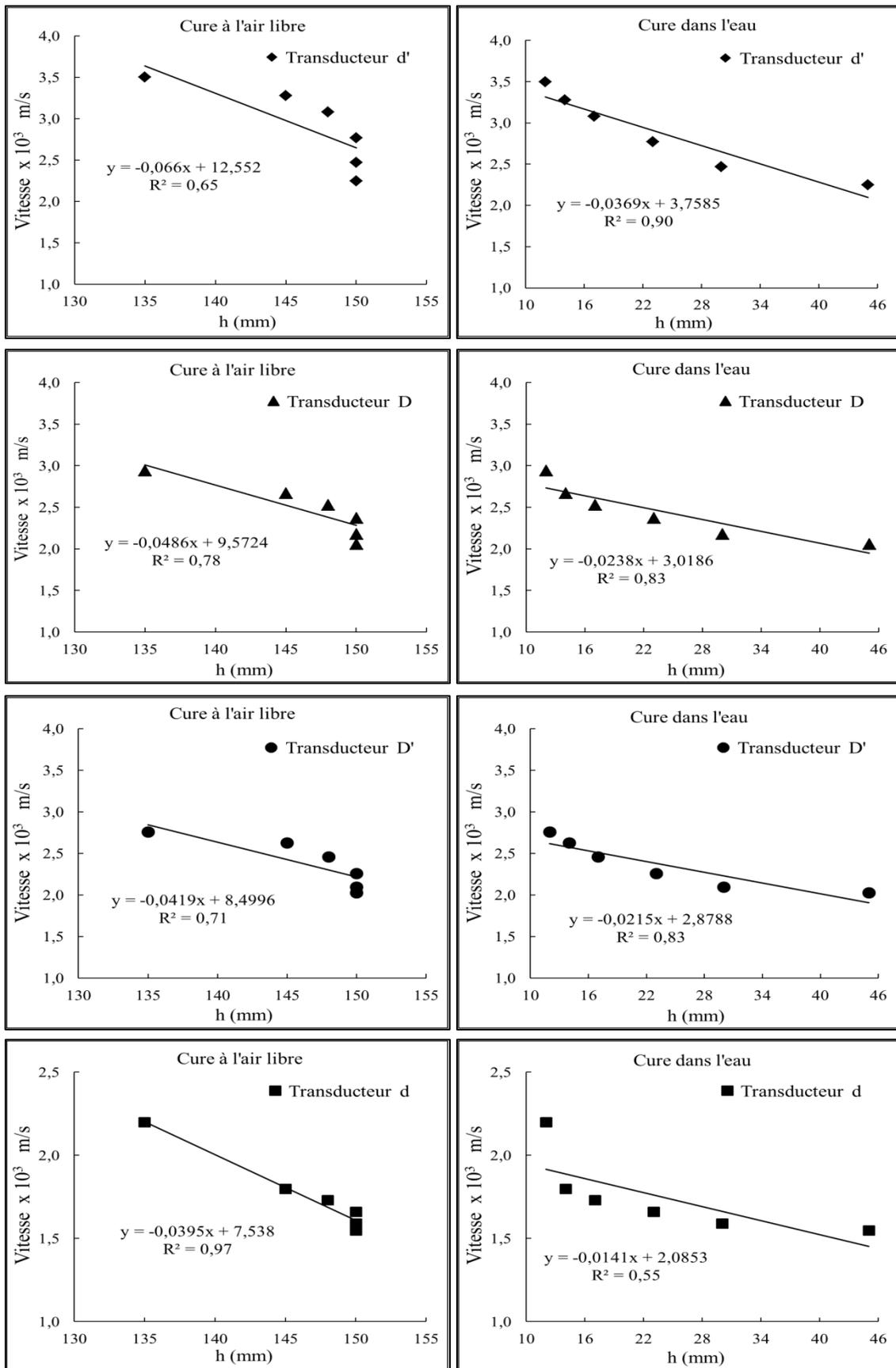


Figure IV.20: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BO.

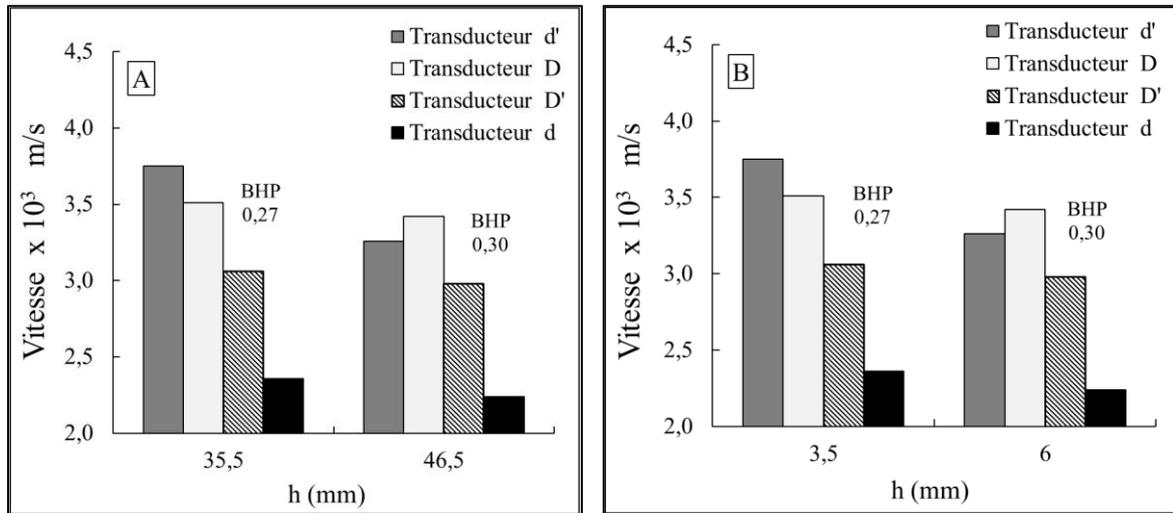


Figure IV.21: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

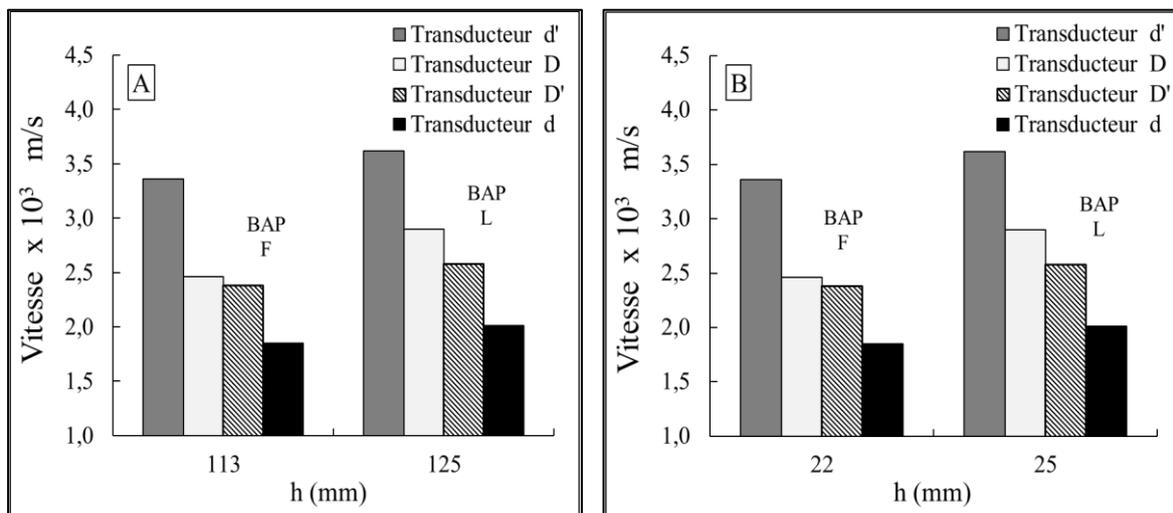


Figure IV.22: Corrélation entre la vitesse ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BAP A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

#### IV.11 Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la porosité

Les courbes de la figure IV.23 reflètent la relation entre l'atténuation des ondes ultrasonore et la porosité pour les bétons ordinaires. On observe clairement l'augmentation de l'atténuation avec l'accroissement de la porosité pour les deux modes de cure à l'air libre et dans l'eau. La régression des courbes est de type linéaire. Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres études Lafhaj et al [117] avec la méthode de contact et Abraham et al [126] avec la méthode sans contact. On remarque que ces régressions sont meilleures pour les transducteurs **D'** ( $\varnothing 49.5$ ,  $f=25\text{kHz}$ ) et **d** ( $\varnothing 7.5$ ,  $f=54\text{kHz}$ ) surtout pour une conservation à l'air libre. Il est également noté que l'augmentation de la fréquence des transducteurs influence négativement la corrélation [85], ceci est dû à la diminution de la longueur d'onde (augmentation du nombre d'ondes) donc la sensibilité à la porosité devienne plus importante par ces transducteurs. L'augmentation du diamètre des transducteurs n'a pas influé cette corrélation, ceci peut être en raison des effets de diffraction [122-124].

Pour des valeurs de porosité inférieure où égale à 17% données par les bétons plastiques à très plastiques, on remarque que l'atténuation fluctue avec la porosité. Les bétons fluides ( $E/C > 0.60$ ) avec une porosité supérieure à 17%, l'atténuation est croissante.

Selon Vergara [123], les méthodes basées sur le bruit structural et sur l'atténuation présentent des tendances claires, mais pas avec la précision qui serait nécessaire pour être considérées comme une technique fiable pour mesurer la porosité.

Fnine [85] n'a pas constaté une tendance bien visible entre l'atténuation des ondes haute fréquence et la croissance de la porosité ou de la profondeur de carbonatation, ainsi que les coefficients de régression linéaire sont très mauvais car l'atténuation évolue dans tous les sens que ce soit en fonction la croissance de la porosité ou de la profondeur de carbonatation.

Les différentes mesures de l'atténuation des BHP (fig. IV.24) montrent que la faible porosité se traduit par une faible atténuation des ondes ultrasonores. L'atténuation augmente de 48, 8, 8 et 27% respectivement pour les transducteurs « d', D, D' et d » quand la porosité augmente de 30% en moyenne dans les deux modes de cure. Les transducteurs d' ( $\varnothing 49.5$ ,  $f=150\text{kHz}$ ) et d ( $\varnothing 7.5$ ,  $f=54\text{kHz}$ ) sont plus influencés par la variation de la porosité

Concernant les deux BAP (fig. IV.25), la variation de l'atténuation ultrasonore avec la porosité est faible pour les transducteurs d' ( $\varnothing 49.5$ ,  $f=150\text{kHz}$ ), D ( $\varnothing 49.5$ ,  $f=54\text{kHz}$ ) et D' ( $\varnothing 49.5$ ,  $f=25\text{kHz}$ ), l'augmentation de la porosité de 13% s'est reflétée par une perte d'énergie minimale des ondes ultrasonore.

Les transducteurs d ( $\varnothing 7.5$ ,  $f=54\text{kHz}$ ) ont donné une augmentation de l'atténuation de plus de 60%. On remarque que ces transducteurs, comme pour les BHP, sont plus sensibles à la variation de la porosité.

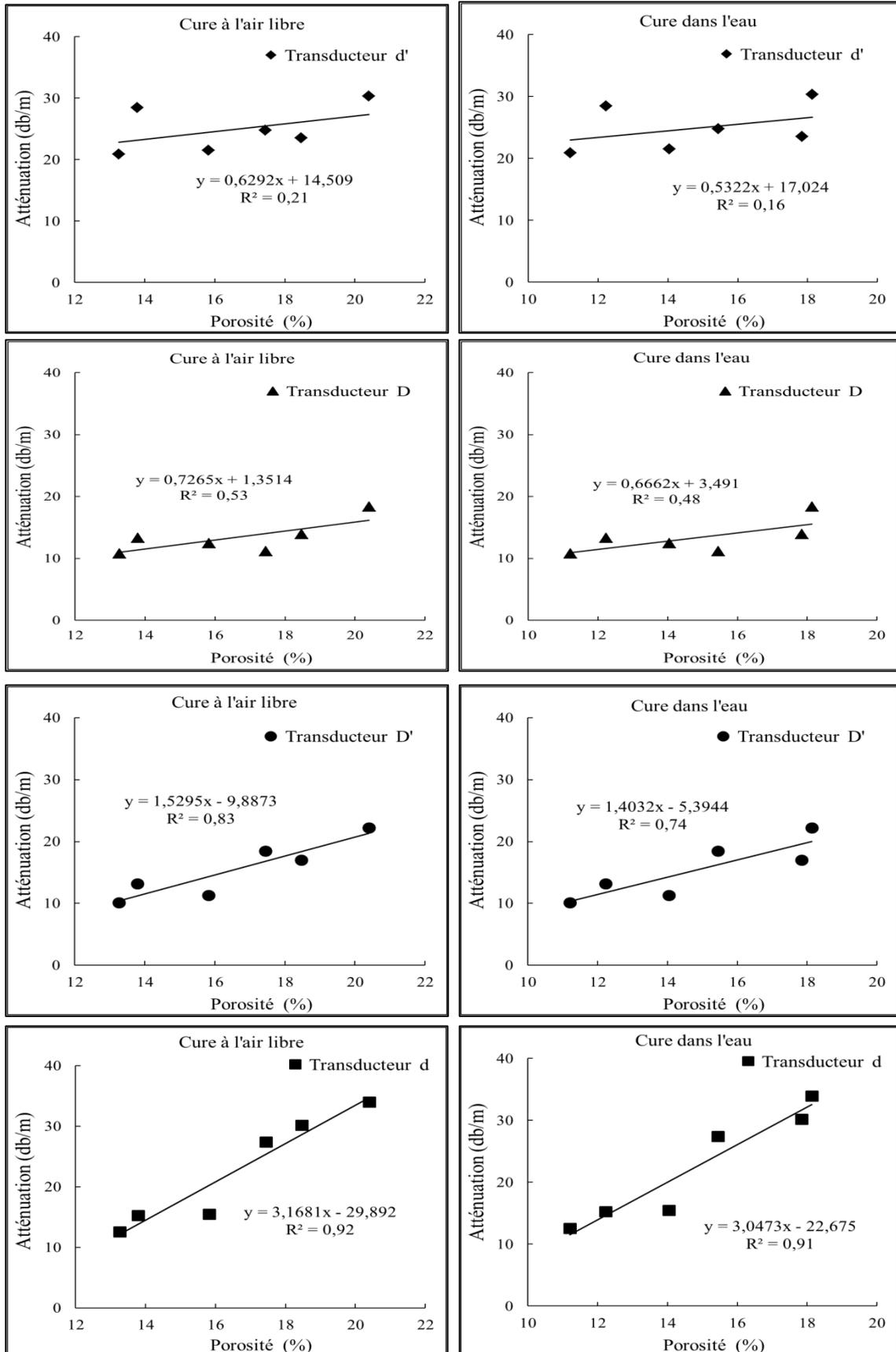


Figure IV.23: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la porosité pour les BO.

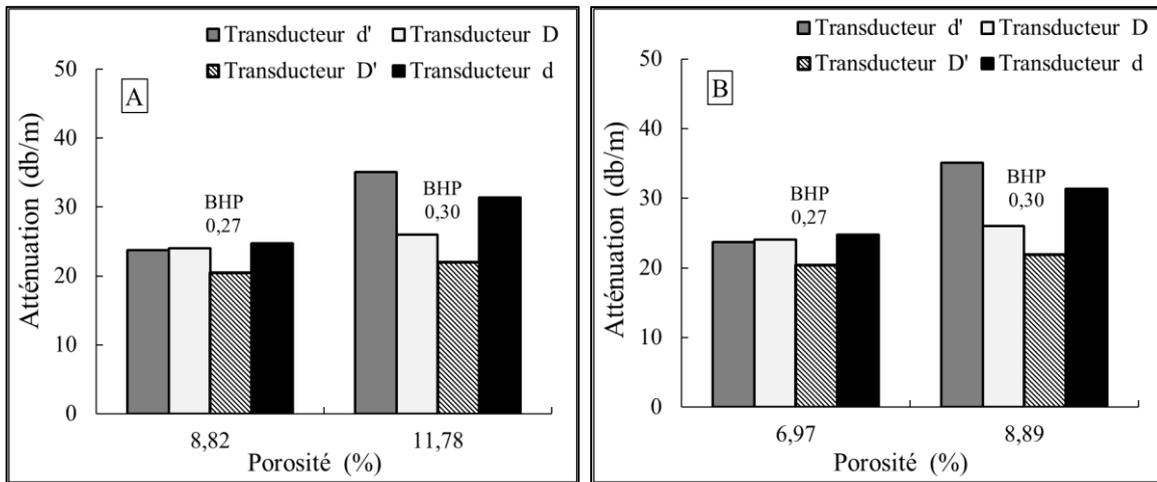


Figure IV.24: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la porosité pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

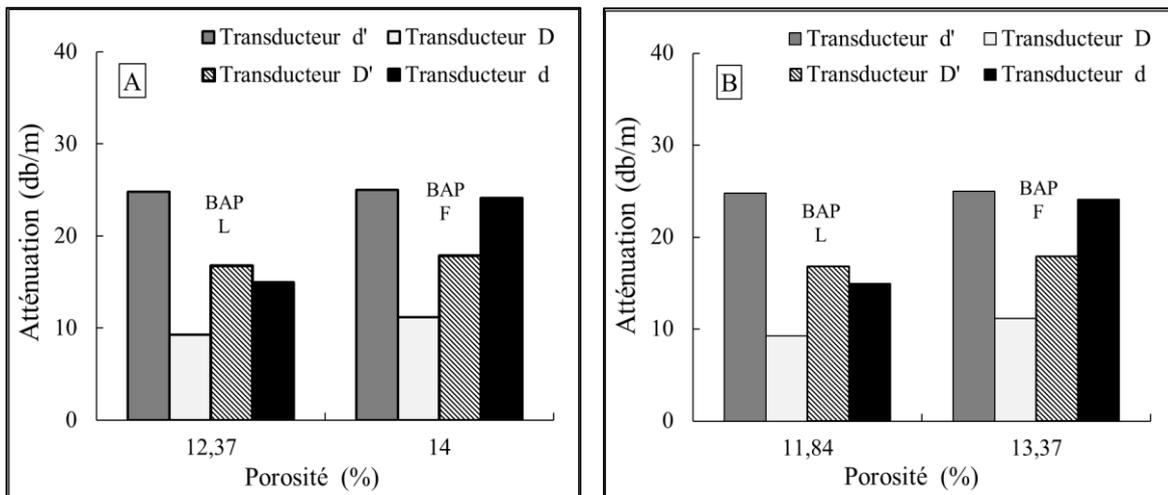


Figure IV.25: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la porosité pour les BAP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau

#### IV.12 Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'air

Les courbes de la figure IV.26 présentent la corrélation entre l'atténuation des ondes ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les bétons ordinaires. On peut constater clairement, l'augmentation de l'atténuation avec l'augmentation de la perméabilité à l'air conservés à l'air libre et dans l'eau. Des résultats similaires ont été observés par Lafhaj et al [117] qui ont travaillé sur les corrélations entre la porosité, la perméabilité et les paramètres ultrasonores sur des mortiers sec, partiellement et complètement saturé. L'acquisition des différents transducteurs montre que la corrélation est sensiblement linéaire. Les coefficients de corrélation présentés sur les courbes montre que la cure dans l'eau des bétons conduit à une meilleure comme indiqué par Abraham [126]. On remarque aussi que la faible corrélation est donnée par les transducteurs du haute fréquence d'(Ø49.5, f=150khz), cette dernière est similaire à la relation atténuation-porosité pour les mêmes transducteurs, selon Chi-Won In [125] et Yu Zhang [71] l'accroissement de la fréquence conduit à l'accroissement de l'atténuation.

Pour les valeurs de perméabilité à l'air inférieures à  $66 \times 10^{-17}$  pour les bétons conservés à l'air libre et inférieures à  $12.4 \times 10^{-17}$  pour les bétons conservés dans l'eau, la relation entre l'atténuation et la perméabilité à l'air n'est pas bien claire. Cette relation devient plus précise pour des perméabilités supérieures à celles avancées précédemment. Donc l'estimation de la perméabilité par le biais de l'atténuation est possible pour des bétons perméables. On rejoint le même constat que dans le cas de la porosité quant à l'estimation de ces paramètres pour les bétons plastiques.

Les histogrammes IV.27 et IV.28 présentent l'évolution de l'atténuation ultrasonore en fonction de la perméabilité à l'air respectivement pour les BHP et les BAP. On peut observer par ces deux figures que l'atténuation présente un comportement similaire à celui de la vitesse (histogramme IV.18 pour BHP et histogramme IV.19 pour BAP), sauf que lorsque la vitesse diminue, l'atténuation augmente. On remarque aussi que le comportement de la corrélation atténuation-perméabilité à l'air s'adapte avec celui de la corrélation atténuation-porosité pour les deux types de béton (histogramme IV.24 et histogramme IV.25). Donc on distingue par ces remarques la forte relation entre la porosité et la perméabilité à l'air par le biais de l'estimation ultrasonore.

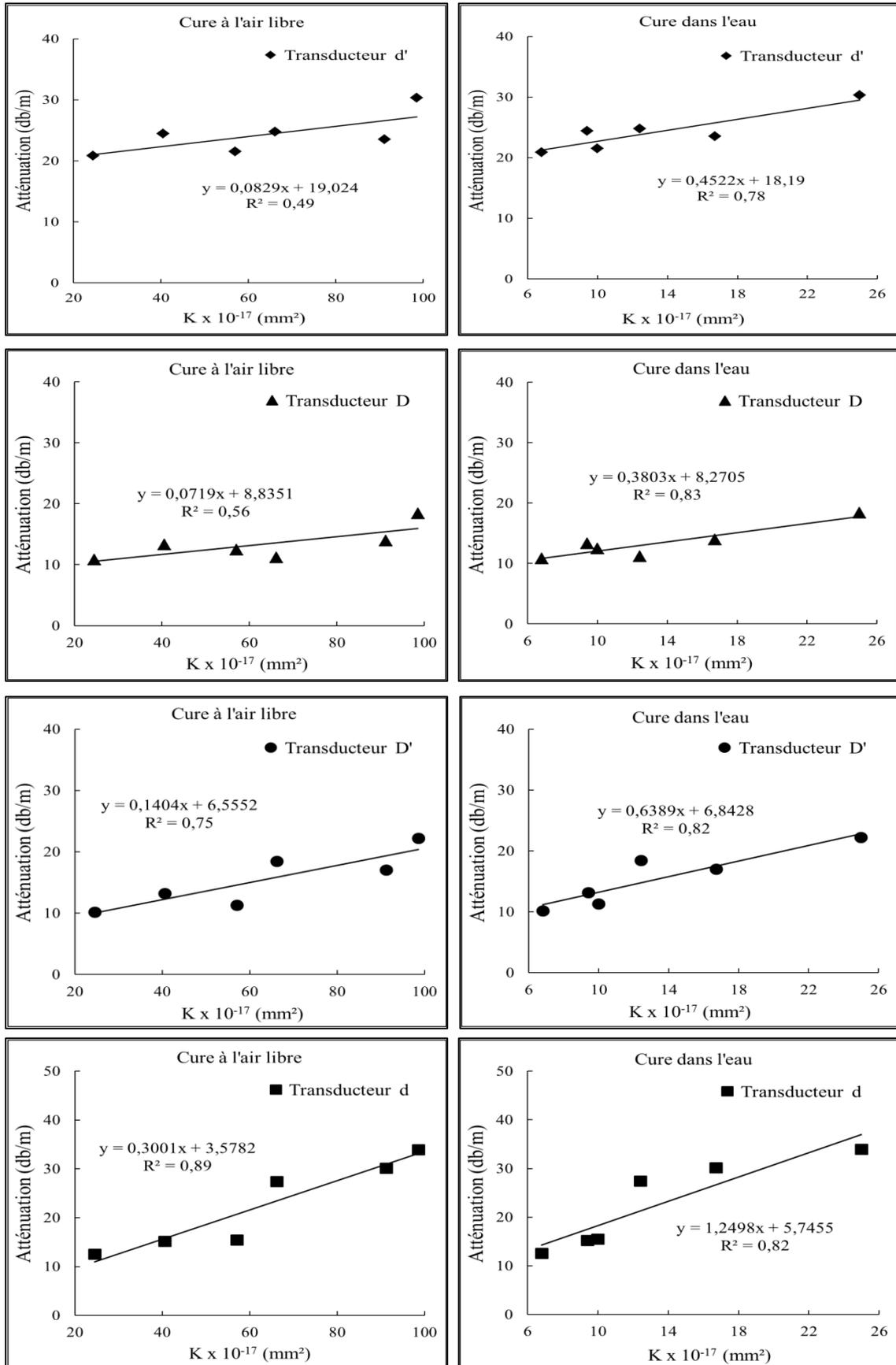


Figure IV.26: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BO.

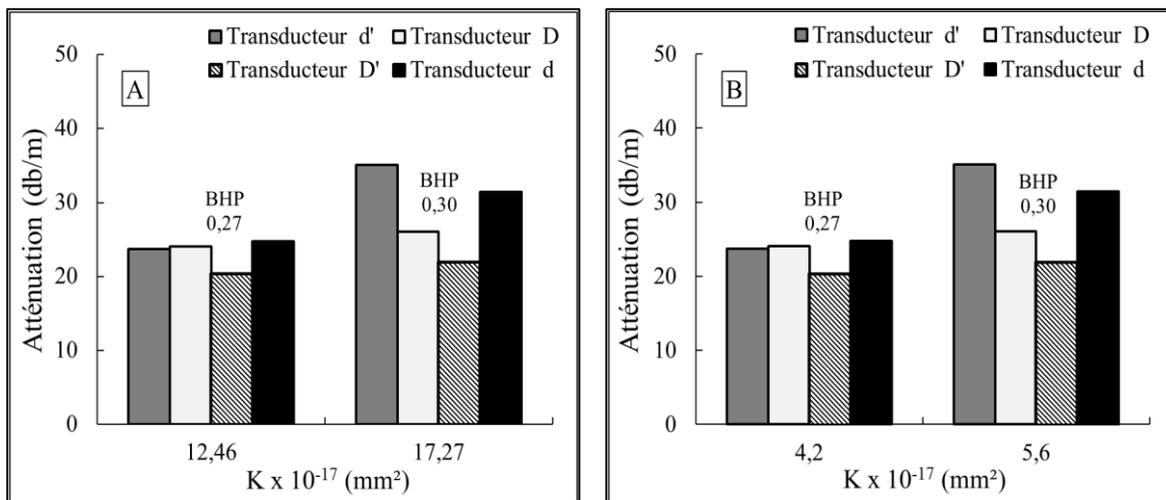


Figure IV.27: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

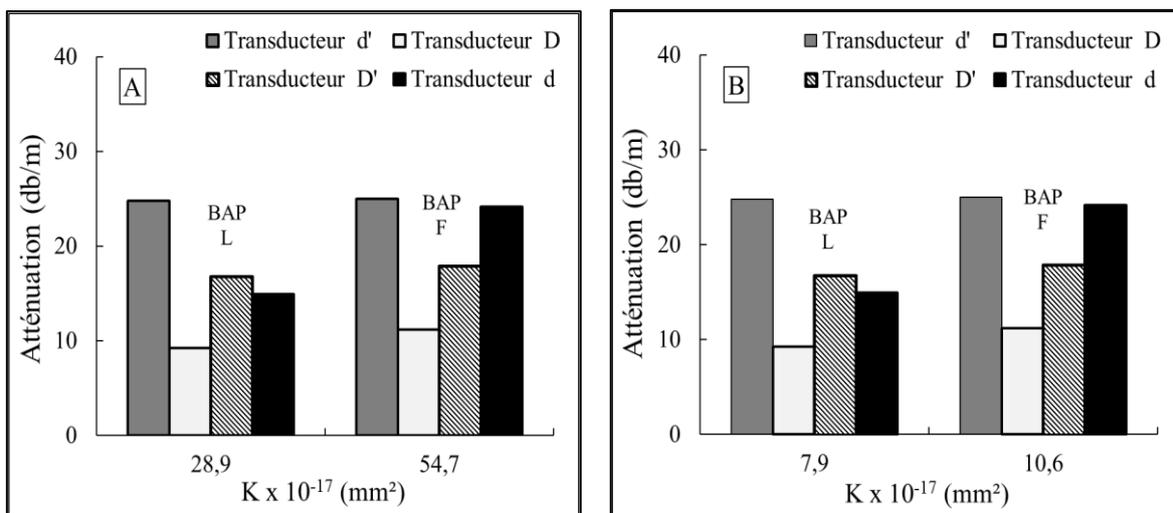


Figure IV.28: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'air pour les BAP A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

#### IV.13 Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'eau

En général, on observe que l'atténuation augmente avec l'augmentation de la perméabilité à l'eau pour les bétons ordinaires (fig. IV.29). La régression observée est proche du linéaire seulement pour les bétons conservés dans l'eau, car la cure humide influence la perméabilité à l'eau par leur saturation ( $h < 5$  cm). Le phénomène inverse se produit pour la conservation à l'air libre des bétons, les coefficients de la tendance sont faibles car la pénétration d'eau atteint la hauteur totale de l'éprouvette du test pour la majorité des bétons utilisés et la fluctuation de la perméabilité s'annule.

Pour une pénétration d'eau supérieure à 17 mm pour les bétons conservés dans l'eau, l'atténuation atteint un taux d'accroissement de 41, 48, 97 119 % donnés respectivement par les transducteurs « d', D, D' et d », donc on note un taux important de perte d'énergie dans les mesure ultrasonore, selon d'autres travaux [117, 123], l'atténuation augmente avec la porosité, la perméabilité et l'eau contenu. On observe que la meilleure estimation de la perméabilité à l'eau à partir de l'atténuation ultrasonore est celle obtenue par les transducteurs **d** ( $\varnothing 7.5$ ,  $f=54\text{kHz}$ ). Ce constat conforte l'aptitude de ces transducteurs à estimer ces trois paramètres (porosité, perméabilités à l'air et à l'eau) à travers l'atténuation ultrasonore.

L'évolution de l'atténuation en fonction de la perméabilité à l'eau pour les BHP est BAP est présentée par les histogrammes IV.30 et IV.31 et montre toujours que l'atténuation diminue pour les bétons de faibles perméabilités, ce comportement est similaire à celui observé pour la porosité et la perméabilité à l'air. On obtient toujours la meilleure estimation par l'intermédiaire des transducteurs **d**, où une augmentation de l'atténuation de 28% pour les BHP et de 60 % s'est reflétée par une augmentation de l'atténuation de 30% concernant les bétons conservés à l'air. Les autres transducteurs et la conservation à l'eau conduisent à des estimations imprécises.

Notons la difficulté, comme avancé par d'autres travaux [116, 127], d'évaluer avec précision la perméabilité particulièrement pour les bétons de faible perméabilité.

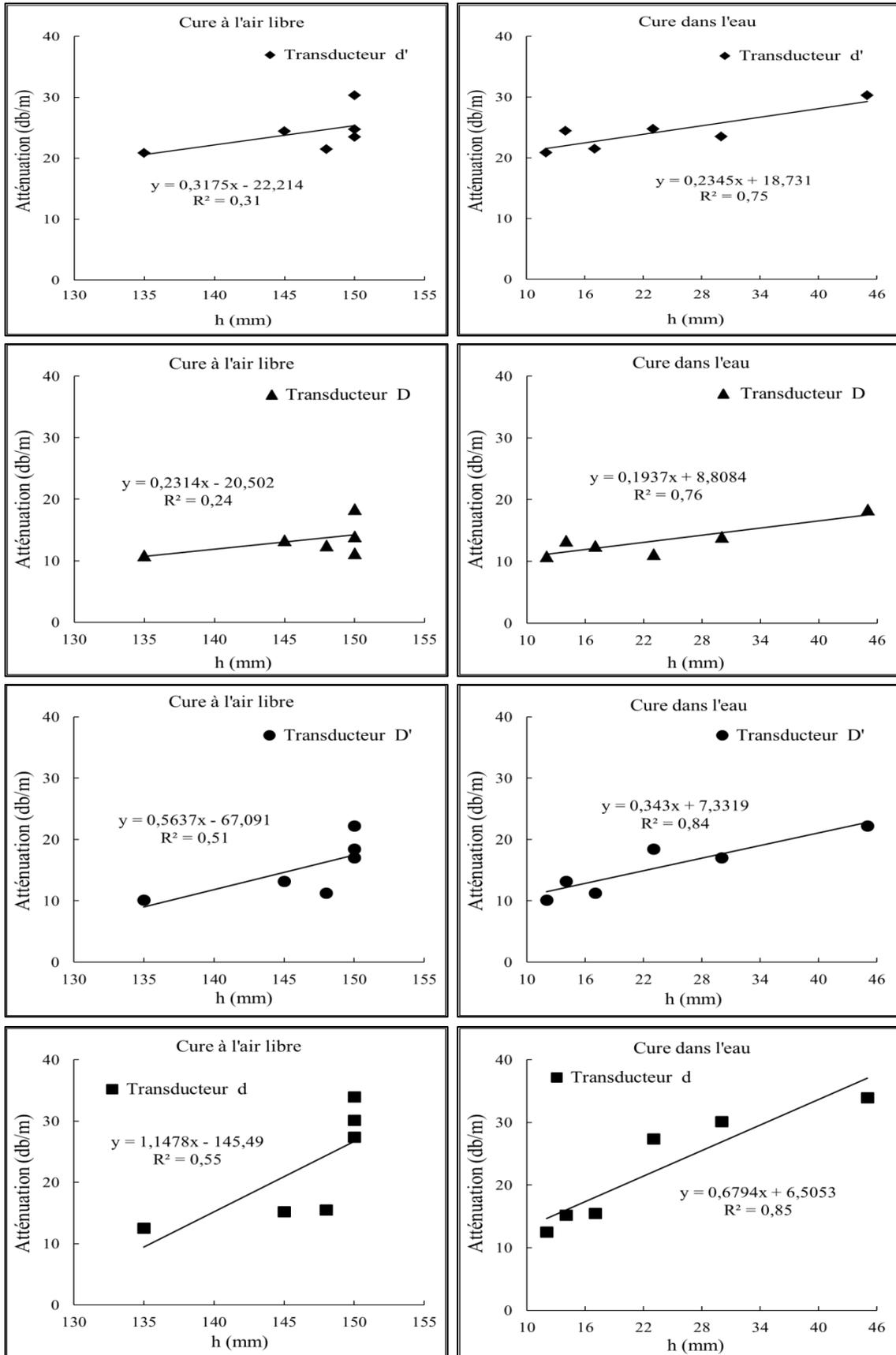


Figure IV.29: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BO.

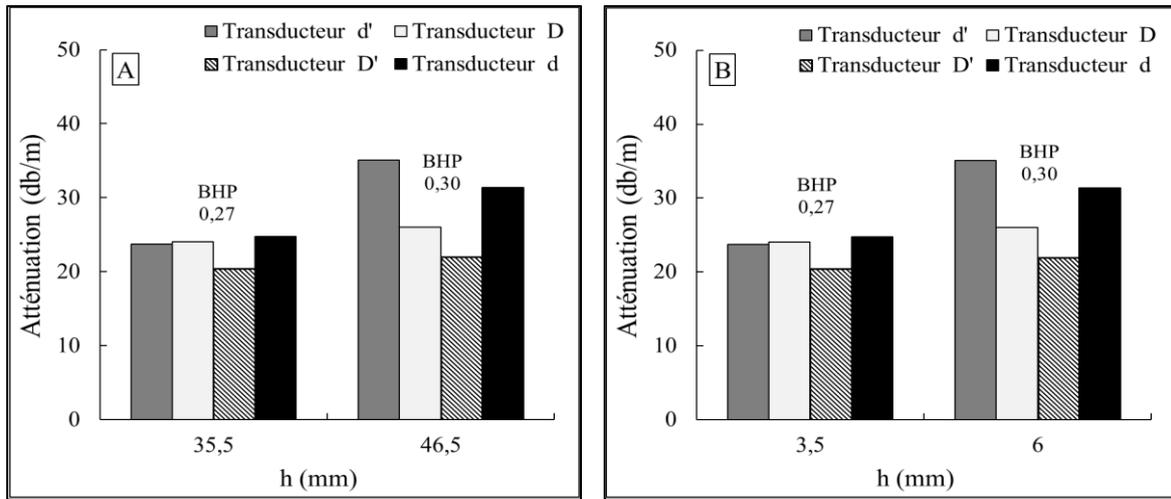


Figure IV.30: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BHP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

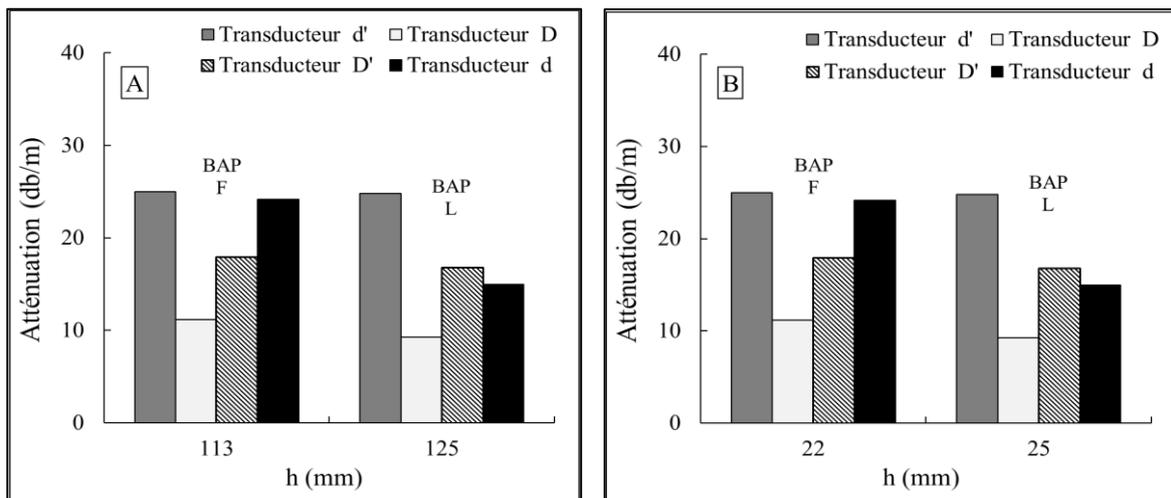


Figure IV.31: Corrélation entre l'atténuation ultrasonore et la perméabilité à l'eau pour les BAP, A) Cure à l'air libre et B) Cure dans l'eau.

#### IV.14 Conclusion

Cette étude a concerné trois volets, à savoir l'évolution des paramètres ultrasoniques (vitesse et atténuation), l'effet de la composition des bétons sur les propriétés de transfert ainsi que les corrélations entre ces différentes propriétés. On constate que :

- ✓ la vitesse des pulsations ultrasoniques présente une relation inversement proportionnelle avec le rapport E/C tandis que l'atténuation est une fonction croissante du rapport E/C. L'augmentation de la fréquence et du diamètre des transducteurs améliorent la précision de l'acquisition des vitesses ultrasonores. Les atténuations les plus importantes sont celles correspondant à la fréquence la plus importante (150 KHz) et l'effet du diamètre sur l'atténuation est plus important dans le cas des bétons ordinaires fluides.
- ✓ L'ajout du laitier des hauts fourneaux dans le BAP améliore la transmission des ondes ultrasonore (augmentation de la vitesse et diminution l'atténuation) comparativement aux fillers calcaires. La porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'air et la perméabilité à l'eau augmentent avec l'augmentation du rapport E/C et la saturation des bétons par la cure dans l'eau fournit une rigidité supplémentaire pour ces propriétés physiques. Le BAP au laitier a une porosité et une perméabilité à l'air inférieure à celles du BAP aux fillers calcaires tandis qu'on observe une évolution inverse dans le cas de la perméabilité à l'eau.
- ✓ La vitesse des impulsions diminue avec la porosité et la perméabilité à l'air et à l'eau, et les différentes acquisitions présentent des régressions linéaires
- ✓ La variation de la vitesse et l'atténuation en fonction de la porosité, la perméabilité à l'air et à l'eau pour les deux BHP et les deux BAP sont similaires à celles observées pour les BO, sauf que l'utilisation de deux compositions pour les BHP et deux pour BAP ne permet pas d'en déduire des corrélations entre les paramètres ultrasoniques et les propriétés des bétons étudiées.
- ✓ L'atténuation présente une évolution inverse à celle de la vitesse. Par conséquent, lorsque la qualité du béton augmente (c'est-à-dire que la porosité et la perméabilité diminuent), le niveau d'atténuation diminue. Contrairement aux vitesses, il est observé des corrélations imprécises des propriétés de transfert et de l'atténuation obtenues par les transducteurs **d'** (**Ø28.5, f=150khz**).

Enfin, il faut noter que la cure dans l'eau des bétons affecte positivement les corrélations signalées précédemment.

---

# **CONCLUSION GENERALE**

---

### **Conclusion générale et perspectives**

Ce travail avait pour objectif, la contribution à la caractérisation des principaux indicateurs physiques de la durabilité du béton qui sont la porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'air et la perméabilité à l'eau en utilisant la vitesse et l'atténuation des ondes ultrasonores. L'idée d'utiliser cette méthode non destructive est motivée par le fait de sa rapidité donc sa facilité à couvrir l'ensemble de l'ouvrage et pour substituer les essais qui exigent le prélèvement des carottes et s'appuient sur une homogénéité du béton dans l'ensemble de l'ouvrage. Les liens réciproques entre la porosité et les deux perméabilités, l'effet de la variation de la fréquence et du diamètre des transducteurs sur les mesures ultrasonores (vitesse, atténuation) ont été également étudié en tenant compte l'influence du rapport E/C et du mode de cure. Les résultats expérimentaux recueillis dans ce travail ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- ✓ la vitesse des pulsations ultrasoniques de surface présente une relation inversement proportionnelle avec le rapport E/C, et l'atténuation est une fonction croissante du rapport E/C. L'addition laitier des hauts fourneaux dans le BAP a un impact positif sur la transmission des paramètres ultrasonores (augmentation de la vitesse et diminution de l'atténuation) plus que l'addition des fillers calcaires.
- ✓ L'augmentation de la fréquence et du diamètre des transducteurs diminuent la divergence du faisceau ultrasonore et améliorent la précision de l'acquisition des vitesses.
- ✓ Les atténuations les plus importantes sont celles correspondant à la fréquence la plus importante (150 KHz) et l'effet du diamètre sur l'atténuation est plus important dans le cas des bétons ordinaires fluides.
- ✓ La porosité accessible à l'eau, la perméabilité à l'air et la perméabilité à l'eau augmentent avec l'augmentation du rapport E/C. On signale également l'effet bénéfique de la cure humide, celle-ci fournit une rigidité supplémentaire pour ces propriétés physiques et améliore la qualité du béton.
- ✓ Le BAP laitier présente une porosité et une perméabilité à l'air plus importante que celle du BAP aux fillers calcaires, par contre la perméabilité à l'eau est légèrement supérieure car le laitier absorbe l'eau et le superplastifiant par conséquent la diminution du seuil de la viscosité de mélange, aussi le laitier est considéré comme une addition minérale chimiquement active et les fillers calcaires sont inertes et ne réagissent pas en présence d'eau.

- ✓ La perméabilité à l'air, la perméabilité à l'eau est une fonction croissante avec la porosité, sachant que la perméabilité ne dépend pas seulement de la porosité mais aussi de la tortuosité, de la distribution, de la taille des pores et de la connectivité des pores.
- ✓ La vitesse d'impulsion diminue avec la porosité et la perméabilité à l'air et à l'eau, et les différentes acquisitions présentent une régression linéaire.
- ✓ L'atténuation présente une évolution inverse à celle de la vitesse, la qualité du béton augmente (c'est-à-dire que la porosité et la perméabilité diminuent), pour une diminution du niveau. Les corrélations les moins fiables de l'atténuation sont obtenues par les transducteurs **d' (Ø28.5, f=150khz)**.
- ✓ La cure humide des bétons affecte positivement les corrélations signalées précédemment car elle joue le rôle d'atténuateur vis-à-vis des propriétés physiques du béton (porosité, perméabilité) et donc moins de dispersion de ces dernières.

Compte tenu des corrélations prometteuses obtenues pour les différents bétons dans cette étude, la vitesse des ondes de surface présente une indication des propriétés physiques étudiées du béton plus fiable que l'atténuation. L'hétérogénéité du matériau béton impacte plus l'atténuation provoquant des fluctuations dans l'amplitude résultant en une complexité.

De ce fait nous pensons que d'autres études sont nécessaires pour établir si les mesures ultrasoniques peuvent être considérées comme un outil fiable utilisé pour déduire les indices de durabilité des structures en béton étudiées in situ.

On pense principalement à une couverture plus étendue des compositions des bétons, à la caractérisation des agressions et attaques des bétons par les ultrasons pour enfin proposer un outil unique permettant un diagnostic non destructif et rapide de la durabilité in situ des ouvrages en béton.

---

# **Références bibliographiques**

---

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE**

- [1] **Dupain R., Lanchon R., Saint-Arroman J.C.**, Granulats, sols, ciments et bétons. Edition Casteilla, Paris, 2000.
- [2] **Cimbéton.**, Les bétons: formulation, fabrication et mise en œuvre. Paris, 2006.
- [3] **Ouchi M.**, State of the art report on self compactability evaluation. Concrete Engineering Series, N° 30, Japan, 1999, pp 111-120.
- [4] **Chanvillard G., D'Aloia L.**, Préviation de la résistance en compression au jeune âge du béton, Application de la méthode du temps équivalent, Bull. Liaison Lab. Ponts et Chaussées, 1994, Vol 193, pp 39-51.
- [5] **Nguyen T.L.H.**, Outils pour la modélisation de la mise en œuvre des bétons. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2007.
- [6] **Veronique Nobel Pujol-Lesueur.**, Etude du mécanisme d'action du monofluorophosphate de sodium comme inhibiteur de la corrosion des armatures métalliques dans le béton. Thèse de doctorat, Université Paris 6, Université Pierre et Marie Curie, 2004.
- [7] **Afnor.**, Béton et constituants du béton. Tome 1 : Spécifications du béton et de ces constituants, 5<sup>eme</sup> édition. Paris, 2002.
- [8] **Aïtcin P.C.**, Bétons haute performance. Editions Eyrolles. France, 2001.
- [9] **Lapointe R.**, Contribution à l'étude des méthodes d'injections des fissures dans le béton, Mémoire des études graduées, Université McGill, Montréal, Canada, 1997.
- [10] **Dreux G., Festa J.**, Nouveau guide du béton et ses constituants. Editions Eyrolles, Paris, 1998.
- [11] **Dupain R., LANCHON R, Saint-Arroman J.C.**, Granulats, sols, ciments et bétons. Edition Casteilla, Paris, 2000.
- [12] **De Larrard F.**, Structures granulaires et formulation des bétons. Etudes et recherches des laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris, 2000.
- [13] **Hu C.**, Rhéologie des bétons fluides. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1995.
- [14] **Neville A.M.**, Propriétés des bétons. Edition Eyrolles, Paris, 2000.
- [15] **Gallias J.L., Kara-Ali R., Bigas J.P.**, The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. Cement and Concrete Research, 2000, pp 1543- 1549.
- [16] **Koehler E.P., Fowler D.W.**, Aggregates in self - consolidating concrete. International Center for aggregates Research (ICAR), University of Texas at Austin, 2007.
- [17] **Ngoc-Dong L.**, Amélioration de la régularité du béton en production. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2007.
- [18] **Cazacliu B., Guieysse B., Garcin O., Buisson F., Baudru Y., Chanut S., Lallemand-Gamboia I.**, Laboratory evaluation of 9 mixers, rapport LCPC pour le projet européen Innocrete, 2006.
- [19] **Vandanjon J.O., De Larrard F., Dehousse B., Villaine G., Maillot R., Laplante P.**, Homogénéisation des bétons en centrale de fabrication discontinue, Influence du temps de

- malaxage et du mode d'introduction des additions minérales. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 2000.
- [20] **Chopin D.**, Malaxage des bétons à hautes performances et des bétons autoplaçants, Optimisation du temps de fabrication. Thèse de Doctorat de l'École Centrale de Nantes, 2003.
- [21] **Chanvillar G.**, Connaissances générales sur le matériau béton. Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Lyon, 1999.
- [22] **Ali-Boucetta T., Behim M., Laifa W.**, Etude comparative sur l'effet d'une même addition inerte ou chimiquement réactive sur les propriétés des bétons autoplaçants (cas des laitiers granule et cristallise). INVACO2 : Séminaire International, Innovation & Valorisation en Génie Civil & Matériaux de Construction, Rabat-Maroc, 23-25 novembre 2011.
- [23] **Boudchicha A.**, Utilisation des additions minérales et des adjuvants fluidifiants pour l'amélioration des propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons. Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [24] **Zivkovic S.D.**, The effect of increased temperature on fresh and hardened concrete, in: Concrete in hot climates, Proceedings of the third international RILEM conference, London, 1992. pp 3-12.
- [25] **Baron J., Ollivier J.P.**, Les bétons bases et données pour leur formulation. Edition Eyrolles, Paris, 1996.
- [26] **Makhloufi Z., Bouhicha M.**, Formulation du béton calcaire du turonien de Laghouat, Algérie Equipement, 2008. pp 14-21.
- [27] **De Larrard F0, Sitzkar J.C., Hu C.**, Conception d'un rhéomètre pour bétons fluides. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, N° 186, 1993. pp 55-60.
- [28] **Jean-Philippe Perez.**, Etude de l'hydratation des phases constitutives d'un ciment Portland et de la résistance mécanique des pâtes pures et mortiers: influence des trialcanolamines. 2002.
- [29] **Folliot A., Buil M.**, La structuration progressive de la pierre de ciment. Le béton hydraulique, connaissance et pratique, Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1982.
- [30] **Maso J.C.**, La liaison pâte – granulat. Le béton hydraulique, connaissance et pratique. Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1982.
- [31] **Rossi P., Wu X.**, Comportement en compression du béton: mécanismes physiques et modélisation. Bulletin Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées, 1994, pp 89-94.
- [32] **Neville A.M.**, Test on the strength of high-alumina cement concrete. J. New Zealand Inst, 1959, 14 (3), pp 73-77.
- [33] **Alexander K.M., Ivanusec I.**, Long term effects of cement SO3 content on the properties of normal and high-strength concrete, Part I. The effect on strength. Cement and Concrete Research, 1982, 12 (1), pp 51-60.
- [34] **Kakizaki M., Edahiro H., Tochigi T., Niki T.**, Effect of mixing method on mechanical properties and pore structure of ultra high-strength concrete. Katri Report N° 90 Tokyo, 1992.
- [35] **Nielsen L.F.**, Strength development in hardened cement paste: examination of some empirical equations. Materials and Structures, 1993, 26 (159), pp 255-260.
- [36] **Ollivier J.P., Buil M.**, Conception des bétons: la structure poreuse, la durabilité des bétons. Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1992.

- [37] **Rosler M., Odler I.**, Investigations on the relationship between porosity, structure and strength of hydrated portland cement pastes. I. Effect of porosity. *Cement and Concrete Research*, 1985, 15 (2), pp 320-330.
- [38] **Sersale R., Cioffi R., Frigione G., Zenone F.**, Relationship between gypsum content, porosity, and strength of cement. *Cement and Concrete Research*, 1991, 21 (1), pp 120-126.
- [39] **Popovics S.**, Analysis of concrete strength versus water-cement ratio relationship. *ACI Materials Journal*, 1990, 57 (5), pp 517-529.
- [40] **Stock A.F., Hannant D.J., Williams R.I.T.**, The effect of aggregate concentration upon the strength and modulus of elasticity of concrete. *Magazin Concrete Research*, 1979, 31 (109), pp 225-234.
- [41] **Kawakami H.**, Effect of gravel size on strength of concrete with particular reference to sand content. *Proc. Int. Conf. on Mechanical Behaviour of Materials, Kyoto, vol. IV, Concrete and Cement Past Glass and Ceramics, Japan. 1972*, pp 96-103.
- [42] **De Larrard F., Belloc A.**, L'influence du granulat sur la résistance à la compression des bétons. *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, N°219, 1999, pp 41-52.
- [43] **Aissa T, Fettoum K.**, A modified test procedure to measure gas permeability of hollow cylinder concrete specimens. *International Journal of Engineering and Technology*, 2013, 5 (1), pp 91-94.
- [44] **Shi H. S., Xu B.W., Zhou X.C.**, Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 2009, 23 (5), pp 1980-1985.
- [45] **Chang Ye., K Van Breugel., A.L A Fraaij.**, Experimental study on ultrasonic pulse velocity evaluation of the microstructure on cementitious material at early age. *Heron*, 2001, 46 (3), pp 161-167.
- [46] **Mehamdia A., Benouis A.**, Contribution à l'estimation de la perméabilité à l'air des bétons par les vitesses des ultrasons. 33èmes Rencontres de l'AUGC, ISABTP/UPPA, Anglet, Beyonne, France, 27-29 mai 2015.
- [47] **Wood S.L.**, Evaluation of the long-term properties of concrete. *ACI Materials Journal*, 1991, 88 (6), pp 630-643.
- [48] **Andre Oibasi.**, *Cour de structure en béton, Chapitre 2, Les matériaux en présence. Ecole d'ingénieur et d'architecte de Fribourg*, 2003.
- [49] **Benouis A., Mehamdia A.**, Contribution à l'estimation de la perméabilité à l'eau des bétons par les vitesses des ultrasons. *MATEC Web of Conferences* 149, 01065, 2018.
- [50] **Singh N.B., Reetika S., XSingh N.B., Shukla A.K.**, Effect of temperature on the hydration of ordinary Portland cement in the presence of a superplasticizer. *Thermochimica Acta*, 1994, 247 (2), pp 381-388.
- [51] **Zhang Gallucci E., Xinyu., Scrivener K.**, Influence de la température sur le développement microstructural des bétons. Septième édition des Journées scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton. Toulouse, France, 19-20 juin 2006.
- [52] **Verbeck G.J., Helmuth R.A.**, Structures and physical properties of cement paste, *Proceeding 5th Int. Symp. On the Chemistry of cement, Tokyo, 1968*, 3, pp 1-32.

- [53] **Kjellsen K.O., Detwiler R.J., Gjorv O.**, Backscattered electron imaging of cement pastes hydrated at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 1990, 20 (2), pp 308-311.
- [54] **Bentur A., Mitchell D.**, Material performance lessons. *Cement and Concrete Research*. 2008, 38, pp 259-272.
- [55] **Mohamed Lyes Kamel Khouadja.**, Etude des propriétés physico-mécanique et rhéologique des bétons à base des sables de carrières : expérimentation et modélisation. Thèse de Doctorat, Université de Biskra, 2016.
- [56] **Perte Lazar.**, Evaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers. Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 2000.
- [57] **AFGC.**, Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion. CEFRACOR, 2003.
- [58] **Oualit Mehena.**, Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien. Mémoire de Magistère, Université BOUMERDES, 2009.
- [59] **El Houssain Rochdi.**, Contribution à l'analyse du comportement mécanique de dalles en béton arme renforcées par matériaux composites. Thèse de Doctorat, Université CLAUDE BERNARD, LYON, 2004.
- [60] **Rita De Cassia Silva.**, Contribution a l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2004.
- [61] **Delmas L., Baillot T.**, Influence de la mise en œuvre sur la porosité des bétons. Projet de Recherches Technologiques, Institut National des Sciences Appliquées, Projet de Recherches Technologiques, 2006.
- [62] **Plassais A.**, Nanoporosité, texture et propriétés mécaniques de pâtes de ciments. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Mariez Curie, Paris, 2003.
- [63] **Sahu S., Col.**, Determination of water–cement ratio of hardened concrete by scanning electron microscopy. *Cement and Concrete Composites*, 2004, 26 (8), pp 987-992.
- [64] **Marta Choinska.**, Effets de la température, du chargement mécanique et de leurs interactions sur la perméabilité du béton de structure. Thèse de doctorat, Ecole doctoral de mécanique thermique, Nantes, 2006.
- [65] **Caré S., Derkx F.**, Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars. *Construction and Building Materials*, 2011, 25 (3), pp 1248-1256.
- [66] **Darcy H.**, Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Edition Dalmont, 1856.
- [67] **Klinkenberg L.G.**, The permeability of porous media to liquid and gases. *API Drilling and production practices*, 1941, pp 200-213.
- [68] **Cassagnabere F.**, Produits préfabriqués en béton file:vers l'amélioration des performances du matériau pour mieux gérer le procède de production. Thèse de doctorat, Université Toulouse III , 2007.
- [69] **Edvarsen C.**, Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Matertials Journal*, 1999, 96 (4), pp 448–454.
- [70] **Bamforth P.B.**, The relationship between permeability coefficients for concrete obtained using liquid and gas. *Magazine of Concrete Research*, 1987, 39 (138), pp 3-11.

- [71] **Yu Zhang., Yixian X., Jianghai X.,** Analysis of dispersion and attenuation of surface waves in poroelastic media in the exploration-seismic frequency band. *Geophysical Journal International*, 2011, 187 (2), pp 871–888.
- [72] **Pigeon D.,** Durabilité et réparation du béton. Cours de l'Université de Sherbrook, Canada, 1999.
- [73] **Atahan H.N., Oktar O.N., Tasdemir M.A.,** Effects of water-cement ratio and curing time on the critical pore width of hardened cement paste. *Construction and Building Materials*, 2009, 23 (3), pp 1996-1200.
- [74] **Cook R.A., Hover K.C.,** Mercury porosimetry of hardened cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29 (6), pp 933-943.
- [75] **Bouasker M., Grondin F., Mounanga P., Khelidj A.,** Retrait chimique des mortiers au très jeune âge: influence des inclusions granulaires. XXIVème Rencontres Universitaires du Génie Civil, La Grande Motte, France, 1-2 juin 2006.
- [76] **Khayat K.H., Aitcin P.C.,** Silica fume in concrete -an overview. *ACI SP-132*, 1993, II, pp 835-872.
- [77] **Abdeslam Laghcha.,** Contribution a l'étude des transferts gazeux et liquide au sein des parois en béton endommagées sous sollicitation thermo-hydrrique. Thèse de doctorat, Ecole doctorale des Science Appliquées, LYON, 2006.
- [78] **Sidi Mohammed El Amine Boukli Hacene.,** Contribution a l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de Tlemcen. Thèse de doctorat, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2009.
- [79] **Mourad Adous.,** Caractérisation électromagnétique des matériaux traités de génie civil dans la bande de Fréquences 50 mhz – 13 ghz. Thèse de doctorat, Ecole doctorale sciences et technologies de l'information et des matériaux, Université de Nantes, 2006.
- [80] **Mathieu Chekroun.,** Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale des Sciences pour l'ingénieur géosciences architecture, NANTES, 2008.
- [81] **Ludovic Bodet.,** Limites théoriques et expérimentales de l'interprétation de la dispersion des ondes de Rayleigh: apport de la modélisation numérique et physique. Thèse de doctorat, Ecole doctorale de Nantes, 2005.
- [82] **Maurice Wanin.,** Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1). *Techniques de l'Ingénieur, traité Matériaux métalliques*, 2001.
- [83] **Toukal Abdenour.,** Influence des taux de chargement sur la caractérisation non destructive du béton par ultrasons. Mémoire de magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, 2010.
- [84] **Ladouy S., Errida I, Moumene K., Oumakhir M., Nacih Z.,** Contrôle non destructive 'ultrasons'. <http://www.scribd.com/doc/24272403/Ultra-Sons>.
- [85] **Fnine Abdelilah.,** Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, France, 2006.
- [86] **François Saint-Pierre.,** Suivi de l'évolution de la réaction alcalis-silice par méthodes ultrasoniques et par tomographie sonique. Thèse de doctorat en sciences appliquées, Université de SHERBROUKE, 2007.

- [87] **Chekroun M., Lu L., Loïc L.M., Abraham O., Villain G., Durand O.**, Diffusion multiple des ultrasons pour l'évaluation non destructive du béton avec des ondes de surface. Conférence COFREND, Toulouse, France, 2008.
- [88] **Rosaat M., Corneloup G., Garnier V., Chaix J.F.**, Amélioration de la modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux diphasiques. 18<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique, Grenoble, 27-31 aout 2007.
- [89] **Benouis A., Grini A.**, Estimation of concrete's porosity by ultrasounds. *Physics Procedia*, 2011, 21, pp 53 – 58.
- [90] **Zahira Ghalmi.**, Contribution au développement d'un capteur ultrasonique pour mesurer l'épaisseur de la glace. Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi, 2006.
- [91] **Riad Al Wardany.**, Caractérisation non destructive des structures en béton au moyen des ondes dispersives de Rayleigh et Lamb. Thèse de doctorat, Université Cergy-Pontois, France, 2005.
- [92] **Nassima Khial.**, Utilisation des méthodes non destructives pour la caractérisation des bétons dans un environnement agressif. Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2016.
- [93] **Marie-Aude Ploix.**, Etude de l'atténuation des ondes ultrasonores. application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2006.
- [94] **Saiyouri N., Bouasker M., Khelidj A.**, Gas permeability measurement on injected soils with cement grout. *Cement and Concrete Research*, 2008, 38 (1), pp 95-103.
- [95] **Picandet V., Khelidj A., Bastian G.**, Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31 (11), pp 1525–1532.
- [96] **Manuel D'Utilisation.** Appareil pour mesurer la perméabilité à l'air (Compte-bulles). Réf. E0651. Controlab.
- [97] **German Standard DIN 1048 Part 5.**, Testing concrete Water permeability. Section 3.6, 1991.
- [98] **Goueygou M., Piwakowski B., Ould Naffa S., Buyle-Bodin F.**, Assessment of broadband ultrasonic attenuation measurements in inhomogenous media. *Ultrasonics*, 2002, 40 (1-8), pp 77–82.
- [99] **Monteiro P.J., King M.S.**, Experimental studies of elastic wave propagation in high-strength mortar. *Cement Concrete and Aggregates*, 1988, 10 (2), pp 68–74.
- [100] **Kollek J.J.**, The determination of permeability of concrete by cembureau method a recommendation. *Material and Structure*, 1989, 22 (3), pp 225-230.
- [101] **Dreux G., Festa J.**, Nouveaux guide du béton et de ces constituants. 8<sup>ème</sup> Edition Eyrolles, Paris, 1998.
- [102] **Joseph O., Owin O., Laurence J., Jacob S.**, Attenuation measurements in cement-based materials using laser ultrasonic. *Journal of Engineering Mechanics*, 1999, 125 (6), pp 637-647.
- [103] **Tobias M., Müller., Boris G., Maxim L.**, Seismic wave attenuation and dispersion resulting from wave-induced flow in porous rocks. *Geophysics*, 2010, 75 (5), pp 147-164.

- [104] **Boel V., De Schutter G.**, Porosity of superplasticized cement past containing limestone filler. *Advances in Cement Research*, 2006, 18 (3), pp 97-102.
- [105] **Aïtcin P.C.**, L'interaction ciment/superplastifiant: cas des polysulfonates. *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 2001.
- [106] **Ben Messaoud S., Mezghiche B.**, Formulation des bétons à hautes performances. *Revue de génie industriel*, 2011, (6), pp 4-15.
- [107] **Benzaïd Mahdi.**, Contribution à l'étude du comportement à haute température des BAP. Thèse de doctorat, Université de Guelma, 2017.
- [108] **Derabla Riad.**, Influence des additions minérales sur le comportement au jeune âge et à long terme des bétons autoplaçants traités thermiquement. Thèse de doctorat, Université de Guelma, 2015.
- [109] *Ultrasonic Transducers Technical Notes Olympus NDT*. 2006, pp 40-48.
- [110] **Tarek Ibrahim Mahmoud Selouma.**, Evaluation of the degradation process of cement-based materials exposed to aggressive environment by using ultrasonic techniques and physical characterization. Thesis of doctorat, Valencia, Spain, 2013.
- [111] **Mohamed Rebhi.**, Apport à la caractérisation de la porosité ouverte du béton d'enrobage par l'utilisation des tests d'absorption capillaire. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2014.
- [112] **Balayssac P.J., Detriche H., Grandet J.**, Influence de la cure humide sur les caractéristiques du béton de peau. *Materials and Structures*, 1998, 31, pp 325-328.
- [113] **Rabehi M., Guettala S., Mezghiche B.**, La porosité ouverte du béton d'enrobage: correlation between compressive strength and initial absorption. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2012, 16 (6), pp 730–743.
- [114] **Shi., Tanigawa Y., Mori H., Kurokawa Y.**, A study of effect of superfine powders on fluidity of cement paste. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 1998, 20 (2), pp 9-14.
- [115] **Behim M.**, Sous produits industriels et développement durable : Réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'El-Hadjar dans les matériaux à matrice cimentaire. Thèse de doctorat d'état en cotutelle Université d'Annaba – INSA de Toulouse, France, 2005.
- [116] **Chahine Belghit.**, Contribution à la formulation d'un béton autoplaçant à base de matériaux locaux effet du laitier granule micronisé sur l'ouvrabilité. Mémoire de Magister, Université d'Annaba. 2009.
- [117] **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*, 2006, 36 (4), pp 625-633.
- [118] **Yaman I.O., Aktan H.M., Hearn N.**, Active and non-active porosity in concrete: Part II. Evaluation of existing models. *RILEM, Journal of Materials and Structures*, 2002, 35 (246), pp 110– 116.
- [119] **Claisse P.A., Ganjian E., Adham T.A.**, In situ measurement of the intrinsic permeability of concrete. *Magazine of Concrete Research*, 2003, 55 (2), pp 125–132.
- [120] **Gardner D.R., Lark R.J., Barr B.**, The effect of conditioning to a predetermined weight loss on the permeability of concrete. *Construction and Building Materials*, 2007, 21 (1), pp 83-89.

- [121] **Sanjuan M.A., Munoz-Martialay R.**, Oven-drying as a preconditioning method for air permeability test on concrete. *Material Letters*, 1996, 27 (4-5), pp 263-268.
- [122] **Ohdaira E., Masuzawa N.**, Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete-the possibility of NDE. *Ultrasonics*, 2000, 38 (1-8), pp 546-552.
- [123] **Vergara L., Miralles R., Gosalbez J., Juanes F.J., Ullate L.G., Anaya J.J., Hernandez M.G., Izquierdo M.A.G.**, NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar. *NDT & E International*, 2001, 34 (8), pp 557-562.
- [124] **Goueygou M., Soltani F., Lafhaj Z., Piwakowski B.**, Effect of geometrical diffraction on non contact measurements of ultrasonic attenuation in cement based materials. *Proc 7th international symposium on non destructive testing in civil engineering, NDTCE09, Nantes, 2009*, pp 857-862.
- [125] **Chi-Won I., Jin-Yeon K., Kimberly E., Kurtis, Laurence J., Jacobs.**, Characterization of ultrasonic Rayleigh surface waves in asphaltic concrete. *NDT&E International*, 2009, 42 (7), pp 610-617.
- [126] **Abraham O., Piwakowski B., Villain G., Durand O.**, Non-contact, automated surface wave measurements for the mechanical characterisation of concrete. *Construction and Building Materials*, 2012, 37 (1), pp 904-915.
- [127] **Rapoport J.R.**, Using ultrasound to monitor stiffening process of concrete with admixtures. *ACI Material Journal*, 2000, 97 (6), pp 675-683.
- [128] **Garnier V.**, Setting time study of roller compacted concrete by spectral analysis of transmitted ultrasonic signals. *NDT E Int*, 1995, 28 (1), pp 15- 22.
- [129] **Philippidis T.P., Aggelis D.G.**, An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. *Cement and Concrete Research*, 2003, 33 (4), pp 525-538.
- [130] **Achoura D., Lanos CH., Jauberthie R., Redjel B.**, Influence d'une substitution partielle du ciment par du laitier de hauts fourneaux sur la résistance des mortiers en milieu acide. *Journal Physics, France*, 2004, 118 (1), pp 159-164.
- [131] **Chabi S., Mezghiche B., Guettala H.**, Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers. *Courrier du Savoir N°05*, 2004, pp 03-08.
- [132] **Batian Kolani.**, Comportement au jeune âge des structures en béton armé à base de liants composés aux laitiers. Thèse de doctorat, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2012.
- [133] **Vincent M., De Larrard F.**, Prédiction des résistances en compression des bétons au laitier. *Revue Française de génie civil*, 2002, 6 (4), pp 545-562.
- [134] **Zeghichi L.**, Etude des bétons basiques à base des différents granulats. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2006.
- [135] **Bellifa S.**, Evolution de la pométrie des pâtes autoplçantes. Mémoire de magister, Université de Tlemcen, 2012.
- [136] **Hamami A.E.**, Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, France, 2009.
- [137] **Chen W.**, Etude expérimentale de la perméabilité du béton sous conditions thermiques et hydriques variables. Thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille, France, 2011.

- [138] **Baroghel-Bouny V.**, Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons; méthodes, analyse, interprétations. Edition du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 1994.
- [139] **Desmettre C.**, Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques. Thèse de doctorat, Ecole polytechnique de Montréal, Canada, 2011.
- [140] **Yazicioglu S., Caliskan S., Turk K.**, Effect of curing conditions on the engineering properties of self-compacting concrete. *Indian Journal of Engineering & Materials Science*, 2006, 13 (1), pp 25-29.
- [141] **Philippidis T.P. and Aggelis D.G.**, Experimental study of waves dispersion and attenuation in concrete. *Ultrasonics*, 2005, 43 (1), pp 584–595.
- [142] **Izabela Gawęska Hager.**, Comportement à haute température des bétons à haute performance - évolution des principales propriétés mécaniques. Thèse Doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, 2004.
- [143] **Marc G., Zoubeir L., Fethi S.**, Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves. *NDT&E International*, 2009, 42 (5), pp 353–360.
- [144] **Yun-Yong K., Kwang-Myung L., Jin-Wook B., Seung-Jun K.**, Effect of W/C Ratio on Durability and Porosity in Cement Mortar with Constant Cement Amount. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, (7), pp 1-11.
- [145] **Mohamed H., Fouad G., Abdelhafid k., Abdelillah b., Brahim T.**, Influence des paramètres de composition et de cure sur la diffusivité des bétons à base de matériaux locaux. *Nature & Technologie*, 2014, A (10), pp 2-9.
- [146] **Gagné et Aïtcin.**, Superplasticizers for durable concrete, *Comptes rendus de la conférence internationale sur la durabilité du béton*. Monterrey, Octobre, Mexique, 1993.
- [147] **Claisse P.A., Elsayad H.I., Ganjian E.**, Water vapour and liquid permeability measurements in cementitious samples. *Advances in Cement Research*, 2009, 21 (2), pp 83–89.
- [148] **Gallias J.L., Kara-Ali R., Bigas J.P.**, The effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 2000, 30 (10), pp1543-1549.
- [149] **Elhilali Abdelah.**, Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçants (BAP)- influence des fines calcaires et des fibres végétales. Thèse de doctorat de l'université Cergy Pontoise, 2009.
- [150] **Ferraris C.F.**, Measurement of the Rheological Properties of High Performance Concrete : State of the Art Report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, 1999, 104 (5), pp 461-478.
- [151] **Khayat K.H.**, Workability, Testing and performance of self-compacting concrete. *ACI Materials Journal*, 1999. 96 (3), pp 346-352.
- [152] **Panzer T.H., Rubio J.C., Bowen C.R., Vasconcelos W.L., Strecker K.**, Correlation between structure and pulse velocity of cementitious composites. *Advances in Cement Research*, 2008, 20 (3), pp 101–108.
- [153] **Guang Y., Van Breugel K., Fraaij A.L.A.**, Experimental study on ultrasonic pulse velocity evaluation of the microstructure of cementitious material at early age. *Heron*, 2001, 46 (3), pp 161-167.
- [154] **Garnier V., Chaix J.F., Rossat M., Payan C., Corneloup G.**, Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores. 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août 2009.

- [155] **Vincent Picandet.**, Influence d'un endommagement mécanique sur la perméabilité et sur la diffusivité hydrique des bétons. Thèse de doctorat, Ecole doctorale de mécanique, thermique, et génie civil de Nantes, 2001.
- [156] **Hakan G., Süleyman K., Aslhan G., Nil Y.**, Water Content and Temperature Effect on Ultrasonic Pulse Velocity of Concrete. *Russian Journal of Non destructive Testing*, 2017, 53 (2), pp 159–166.
- [157] **Mehamdia A., Benouis A.**, Influence of the size and frequency of contact transducers on the determination of concrete permeability by ultrasonic velocity and attenuation. *Journal of Materials and Environmental Sciences*. 2018, 9 (3), pp 730-740.
- [158] **Tanyidizi H., Coskun A.**, Determination of the principal parameter of ultrasonic pulse velocity and compressive strength of lightweight concrete by using variance method. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2008, 44 (9), pp 639–646.

---

# **ANNEXES**

---

# ANNEXE A

## MEDAPLAST HP

Conforme à la norme NFP 18-502

Ajout à base de micro silice

### DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST HP** est un ajout en poudre pour confection de bétons à hautes performances (BHP). Il permet :

- d'obtenir des bétons durables à résistances mécaniques élevées
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques et atmosphériques

### CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES

- Forme ..... Poudre
- Couleur ..... Grise
- Densité apparente ..... 0,5
- Composants .....  $SiO_2 > 85(\%)$   
.....  $SO_3 < 2,5 (\%)$   
.....  $Cl^- < 0,2 (\%)$
- Aire massique .....  $> 15 (m^2/gr)$
- Humidité par étuve à  $105^\circ C$  .....  $< 1 (\%)$
- Taille des particules .....  $< 0,1 (microns)$

### PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST HP** permet :

#### Sur béton frais :

- d'améliorer la cohésion
- d'éviter le ressuage et la ségrégation

#### Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques
- d'obtenir des bétons possédant une excellente imperméabilité
- d'augmenter la résistance à l'érosion et à l'abrasion
- d'obtenir des bétons résistants aux agressions chimiques
- d'augmenter la durabilité du béton

L'ajout d'un super plastifiant est recommandé (**MEDAPLAST SP, SP40**) afin d'améliorer la fluidité du béton et de diminuer le rapport E/C. Le béton obtenu, une fois appliqué, ne présente aucun ressuage.

### DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Autoroutes, pistes d'aéroport
- Ouvrages d'art, ouvrages hydrauliques
- Bétons très sollicités
- Bétons soumis aux impacts et aux chocs
- Bétons soumis à des milieux agressifs
- Sols industriels
- Silos

### DOSAGE

Le dosage du **MEDAPLAST HP** varie de 5 à 10% du poids du ciment. Ce dosage dépend des performances recherchées.

### MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST HP** est mélangé à sec avec les composants du béton, avant l'ajout de l'eau de gâchage, pendant 1 minute au moins. Après ajout de l'eau de gâchage mélanger encore pendant 2 minutes au minimum.

Malaxer ensuite jusqu'à homogénéisation du béton.

Il est nécessaire de procéder à une cure de plusieurs jours du béton obtenu (toile de jute + arrosage ou **MEDACURE**) surtout par temps chaud ou en présence de courants d'air.

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST HP** est conditionné en sacs de 2kg.

Délai de conservation :

Une année dans son emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur.

### PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex.dz](http://www.granitex.dz)

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer le bouchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex  
غرانيتكس

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger  
Tél: (213) 021 51 66 81 & 82  
Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23  
[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)



# ANNEXE B

## MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2

Super plastifiant - haut réducteur d'eau

### DESCRIPTION

Le **MEDAPLAST SP 40** est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité.

En plus de sa fonction principale de superplastifiant, il permet de diminuer considérablement la teneur en eau du béton.

### CARACTERISTIQUES

- Forme ..... Liquide
- Couleur ..... Marron
- PH ..... 8,2
- Densité .....  $1,20 \pm 0,01$
- Teneur en chlore .....  $< 1\text{g/L}$
- Extrait sec ..... 40%

### PROPRIETES ET EFFETS

Grâce à ses propriétés le **MEDAPLAST SP 40** permet :

#### Sur béton frais :

- d'améliorer la fluidité
- d'augmenter la maniabilité
- de réduire l'eau de gâchage
- d'éviter la ségrégation
- de faciliter la mise en œuvre du béton

#### Sur béton durci :

- d'augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- de diminuer la porosité
- d'augmenter la durabilité
- de diminuer le retrait

### DOMAINES D'APPLICATION

- Bétons à hautes performances
- Bétons pompés
- Bétons précontraints
- Bétons architecturaux

### DOSAGE

Plage de dosage recommandée :  
0,6 à 2,5% du poids de ciment  
soit 0,5 l à 2 l par 100 kg de ciment

Le dosage optimal doit être déterminé sur chantier en fonction du type de béton et des effets recherchés.

### MODE D'EMPLOI

Le **MEDAPLAST SP 40** est introduit dans l'eau de gâchage.

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait été introduite.

### CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg en fûts de 270 kg.

#### Délai de conservation :

Une année emballage d'origine, à l'abri du gel et de la chaleur ( $5^{\circ}\text{C} < t < 35^{\circ}\text{C}$ ).

### PRECAUTION D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : [www.granitex.dz](http://www.granitex.dz)

PV d'essais conforme aux normes, établi par le **CNERIB** en Janvier 2007.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar - BP85 Oued Smar - 16270 Alger  
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82  
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23  
[www.granitex.dz](http://www.granitex.dz) - E-mail: [granitex@granitex.dz](mailto:granitex@granitex.dz)



# ANNEXE C



## FILLERS

### Fiche technique

Le gisement El-khroub occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

#### Caractéristiques chimiques

CaCO <sub>3</sub>	98%
CaO	56,03%
SiO <sub>2</sub>	0,04%
Na <sub>2</sub> O	0,05%
MgO	0,17%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02%
K <sub>2</sub> O	0,02%
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,008%
TiO <sub>2</sub>	0,009%
Chlorure	0,0033%
SO <sub>3</sub> (soluble dans l'eau)	0,0021%
SO <sub>3</sub> (soluble dans l'acide)	0,19%
Soufre totale	0,0137%
Résidu insoluble	1,15%
Solubilité dans l'eau (Ws)	0,24%
Perte au feu	43%
Ph	9

#### Caractéristiques physiques

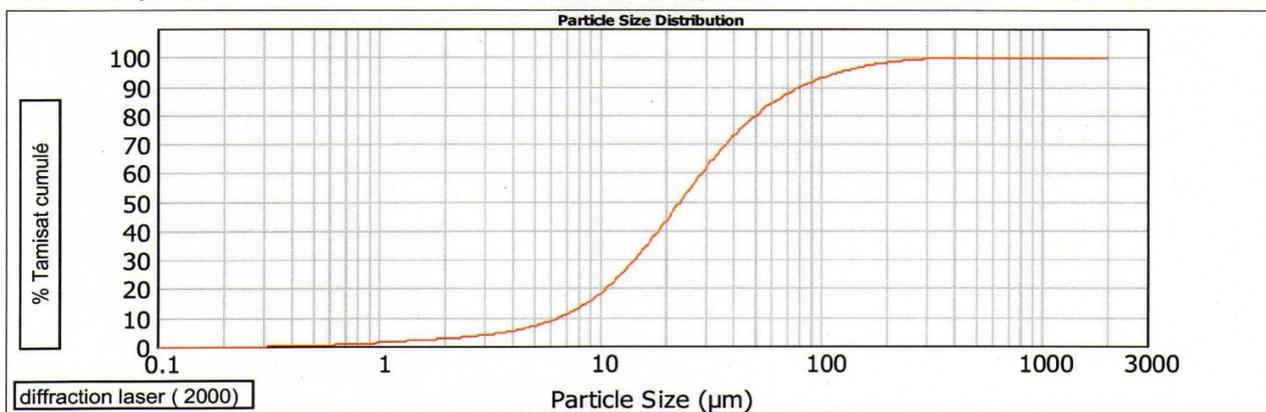
Masse volumique réelle:	2,7
Masse volumique en vrac	1.11gr/cm <sup>3</sup>
Valeur de bleu de méthylène MB <sub>f</sub>	1.67gr/kg

#### Répartition granulométrique

Inférieur à 63µ : 85%

Inférieur à 125µ :95%

Inférieur à 2mm :100%



Les valeurs figurant dans cette fiche technique sont des valeurs caractéristiques moyennes de la production

#### Conditionnement

Vrac  
Big Bag ( 1 tonne )

#### Principales utilisations

Ajout pour matériaux de construction  
Béton roulé compacté ( B R C )

# ANNEXE D

<p>ARCELORMITTAL ANNABA</p> <p>D.MQ</p>	<p><b><u>SPECIFICATION TECHNIQUE</u></b></p> <p>LAITIER DES HAUTS FOURNEAUX</p>	<p>SPT-DMQ/COQ/MPF- 13</p> <p>Page 1 sur 1</p> <p>Edition : Avril/2008</p> <p>Date : 20/04/08</p> <p>Révision : 01</p>
---	---	--

## I OBJET DE LA SPECIFICATION

Il s'agit du laitier rocheux ou granulé produit par les hauts fourneaux 1 et 2.

## II SPECIFICATION TECHNIQUE

### 1. Composition chimique :

- Humidité totale H<sub>2</sub>O = 12 - 18 %
- Fer = 0.5 - 1.9 %
- MnO = 1.3 - 2.5
- CaO = 36 - 46 %
- SiO<sub>2</sub> = 35 - 45 %
- Indice de basicité : CaO/SiO<sub>2</sub> = 0.98 - 1.20
- Soufre = 0.6 - 0.75 %
- MgO = 3.0 - 8
- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 4 - 12 %
- P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ≤ 0,10 %
- Na<sub>2</sub>O ≤ 0,30 %
- K<sub>2</sub>O ≤ 0,50 %
- Densité sur humide = 0,88 - 0,92

### 2. Granulométrie :

- Rocheux : tout venant = 0 - 500 mm
- Granulé = 0 - 5 mm
- > 3,5 mm = 5 % maxi
- 0 - 3 mm ≥ 95 % mini

<u>REDACTEURS</u>	<u>VERIFICATEUR</u>	<u>APPROBATEUR</u>
<p>CHEF SERVICE COQ/PMA-HFx:</p> <p>M: S. FADEL</p>	<p>CHEF DEPARTEMENT COQ/MPF :</p> <p>M : S. KHERAIF</p>	<p>DMQ :</p> <p>M : A.LEMBOUB</p> <p>Date</p> <p>Visa</p>