

République Algérienne Démocratique et populaire
Ministère de L'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouaghi
Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil



Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat LMD

Option : génie civil

Thème :

**Contribution à l'utilisation des outils
d'analyse et d'interprétation de la propagation des ondes
ultrasoniques pour le diagnostic des bétons**

Par

BOUDJEDRA Fatiha

Soutenu le : 08/02/2021

Devant le jury composé de :

M. FERHOUNE Nouredine	Pr. Président	Université Larbi Ben M'hidi - O.E.B
M. BENOUIS Abdelhalim	Pr. Rapporteur	Université 8 mai 1945 - Guelma
M. BOUDAUD Zineddine	Pr. Co- Rapporteur	Université Larbi Ben M'hidi - O.E.B
M. NAFA Zahreddine	Pr. Examineur	Université 8 mai 1945 - Guelma
M. BENSEBTI Salah Eddine	Dr. Examineur	Université Mentouri - Constantine1

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais sincèrement remercier mon directeur de thèse, le professeur **BENOUIS Abdelhalim**, qui m'a soutenu pendant ces années. Je le remercie pour ses encouragements aux moments de difficulté au cours de la thèse et en particulier pour sa grande disponibilité, ses compétences et sa gentillesse.

Je remercie également mon co-directeur de thèse le professeur **BOUDAUD Zineddine** pour ses nombreux conseils scientifiques ainsi que pour son soutien tout au long de ces travaux de recherche.

J'adresse tous mes remerciements aux membres du jury devant lesquels j'ai l'honneur de présenter les travaux de ma thèse : au docteur **FERHOUNE Noureddine** de l'université de Larbi Ben M'hidi - Oum El Bouaghi pour avoir accepté de présider mon jury de thèse, au professeur **NAFA Zahreddine** de l'université 8 mai 1945 - Guelma, ainsi qu'au docteur **BENSEBTI Salah Eddine** de l'université Mentouri - Constantine 1 pour avoir accepté d'être examinateurs de ma thèse.

Mes sincères remerciements au professeur **NOUAOURIA M. Salah** directeur du Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique LGCH de l'université de 8 mai 1945 - Guelma, de m'avoir donné toutes les facilités pour travailler au sein du laboratoire de recherche. Sans oublier tous les doctorants et personnels que j'ai rencontré au sein de ce laboratoire pour leurs soutiens et leurs encouragements.

Je tiens aussi à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé directement ou indirectement pour l'avancement de ce travail.

Enfin, un particulier merci et pleine de gratitude à mes parents, mon frère et mes sœurs à qui je dédie ce mémoire.

RESUME

La connaissance et le suivi des différentes propriétés mécaniques du béton sont primordiaux pour la maintenance des ouvrages de génie civil. La méthode des vitesses ultrasoniques est 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.

Dans le but de contribuer à caractériser les propriétés et la durabilité des bétons par les ondes ultrasonores, dix mélanges de béton ont été utilisés dans cette étude, un béton ordinaire (BO), un béton autoplacant (BAP), quatre bétons ordinaires avec des substitutions du sable par des granulats de caoutchouc (BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20%) et quatre bétons autoplaçants aussi caoutchoutés (BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%).

Les bétons élaborés ont été évalués en vitesse ultrasonique, résistance à la compression et flexion, porosité accessible à l'eau, masse volumique et attaque chimique par les sulfates et par l'eau de mer. Les résultats obtenus ont permis de mettre en évidence les effets du type et âge des bétons, diamètre et fréquence des transducteurs et les milieux agressifs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques. La vitesse ultrasonique varie selon le type du béton et augmente avec la durée de durcissement. Les milieux agressifs (Na_2SO_4 et l'eau de mer) affectent négativement l'évolution de cette vitesse. Les vitesses maximales sont obtenues par les transducteurs de diamètre et fréquence les plus élevés. Les corrélations obtenues pour les différentes propriétés ainsi que quelques aspects de durabilité reflètent une fiabilité de l'utilisation de la méthode ultrasonique pour caractériser les différents bétons étudiés.

Mots clés : Bétons, Vitesse Ultrasonique, Transducteurs, Fréquences, Propriétés, Durabilité, Corrélations.

ABSTRACT

The knowledge and monitoring of the different mechanical properties of concrete are essential for the maintenance of civil engineering structures. The ultrasonic velocity method is among the methods with the greatest potential for non-destructive evaluation of concrete.

The properties of wave propagation are directly related to the properties of the material in which they propagate.

In order to help characterise the properties and durability of concrete by ultrasonic waves, ten concrete mixtures were used in this study, ordinary concrete (BO), self-compacting concrete (BAP), four ordinary concretes with substitutions of sand with rubber aggregates (BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20%) and four self-compacting concretes also rubberized (BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%).

The elaborated concretes were evaluated in ultrasonic velocity, Compressive strength, flexural strength, porosity accessible to water, density and chemical leaching by sulfates and by seawater. The results obtained showed the effects of the type and age of concrete, the diameter and frequency of transducers and the aggressive environments on the evolution of the ultrasonic velocities. The ultrasonic velocity varies depending on the type of concrete and increases by increasing the curing age of concretes. Aggressive environments (Na_2SO_4 and seawater) negatively affect the evolution of this velocity. The higher velocities are obtained by the higher diameter and frequency transducers. The correlations obtained for the different properties as well as some aspects of durability reflect a reliability of the use of the ultrasonic method to characterize the different concretes studied.

Key words: Concretes, Ultrasonic Velocity, Transducers, Frequencies, Properties, Durability, Correlations.

إن المعرفة بمختلف الخواص الميكانيكية للخرسانة ومراقبتها أمران أساسيان لصيانة هياكل الهندسة المدنية. إن تقنية سرعة الموجات فوق الصوتية هي من بين الطرق التي تنطوي على أكبر إمكانية للتقييم غير المدمر للخرسانة. ترتبط خصائص انتشار الموجات بشكل مباشر بخصائص المادة التي تنتشر فيها. وللمساعدة في تحديد خصائص الخرسانة ومتانتها بواسطة الموجات فوق الصوتية، تم استخدام عشرة خلطات خرسانية في هذه الدراسة، خرسانية عادية (BO)، خرسانة ذاتية الوضع (BAP)، وأربع خرسانات عادية مع استبدال الرمل بحبيبات المطاط (BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20%)، وأربع خرسانات ذاتية الوضع مع استبدال الرمل بحبيبات المطاط (BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%). وتم تقييم أنواع الخرسانة المستخدمة بسرعة الموجات فوق الصوتية، قوة الضغط والانثناء، المسامية للمياه، الكثافة، والهجوم الكيميائي بواسطة الكبريتات ومياه البحر. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها تأثير نوع وعمر الخرسانة، قطر المحولات وتردداتها، والبيئات الضارة على تطور سرعات الموجات فوق الصوتية. وتختلف سرعة الموجات فوق الصوتية حسب نوع الخرسانة وتزيد بزيادة وقت المعالجة. تؤثر البيئات القاسية (الكبريتات ومياه البحر) سلبيًا على تطور هذه السرعة. يتم الحصول على أعلى السرعات بواسطة محولات الطاقة ذات القطر الأعلى والتردد الأعلى. وتعكس العلاقات المتبادلة التي تم الحصول عليها من أجل الخصائص المختلفة، وكذلك بعض جوانب الاستدامة، موثوقية استخدام طريقة الموجات فوق الصوتية لتحديد خصائص مختلف الخرسانات التي تمت دراستها.

كلمات البحث: الخرسانة، السرعة فوق الصوتية، محولات الطاقة، الترددات، الخصائص، الاستدامة، علاقات الارتباط.

1.4.2.4	Effets de granulats de caoutchouc(GC) sur les propriétés des bétons à l'état durci	18
1.4.2.4.1	Résistance à la compression.....	18
1.4.2.4.2	Résistance à la traction.....	20
1.4.2.4.3	Résistance à la flexion.....	20
1.4.2.4.4	Module d'élasticité statique et dynamique.....	21
1.5	Durabilités du béton	22
1.5.1	Agents de transfert des agents agressifs.....	22
1.5.2	Dégradations des bétons.....	23
1.5.2.1	L'attaque sulfatique.....	23
1.5.2.2	La pénétration des ions chlorure dans le béton.....	24
1.6	Conclusion.....	25

CHAPITRE. 2. LES METHODES ULTRASONIQUES DANS L'EVALUATION NON DESTRUCTIVE

2.1	Introduction	26
2.2	Importance et nécessité des essais non destructifs.....	26
2.3	Méthode des vitesses d'impulsions ultrasoniques.....	27
2.4	L'onde ultrasonore.....	28
2.5	Phénomènes de propagation des ondes mécaniques.....	28
2.6	Faisceau ultrasonique.....	30
2.7	Grandeurs caractéristiques de la propagation d'ondes ultrasoniques.....	31
2.7.1	Vitesse	31
2.7.2	Atténuation	32
2.8	Équipement et procédure d'essais de vitesse d'impulsion ultrasonique.....	33
2.9	Types de configuration	35
2.9.1	Transmission directe.....	36
2.9.2	Transmission semi-directe.....	36
2.9.3	Transmission indirecte.....	37
2.10	Potentialité des méthodes ultrasonores pour l'évaluation des bétons	37
2.10.1	Facteurs affectant la vitesse ultrasonique.....	37
2.10.1.1	Les granulats.....	38
2.10.1.2	Le rapport Eau/Ciment	38

2.10.1.3	Les additions.....	39
2.10.1.4	L'âge du béton	40
2.10.1.5	Température	40
2.10.1.6	Teneur en eau.....	41
2.10.1.7	Teneur en air	41
2.10.1.8	Les barres d'armature.....	42
2.10.1.9	Diamètres, fréquences et positionnement des transducteurs	42
2.10.2	Caractérisation ultrasonique des propriétés des bétons	43
2.10.2.1	Résistance à la compression.....	43
2.10.2.2	Porosité	45
2.10.2.3	Dommages des bétons.....	46
2.11	Conclusion.....	48

CHAPITRE 3. MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

3.1	Introduction.....	49
3.2	Matériaux utilisés.....	49
3.2.1	Ciment.....	49
3.2.2	Granulats	50
3.2.2.1	Sable	50
3.2.2.2	Gravier	50
3.2.2.3	Granulats de caoutchouc	50
3.2.3	Eau de gâchage	52
3.2.4	Adjuvant	52
3.2.5	Additions	52
3.3	Formulation des différents bétons	53
3.3.1	Formulation des bétons ordinaires (BO et BOCs).....	53
3.3.2	Formulation des bétons autoplaçants	54
3.4	Confection des éprouvettes et cures appliquées.....	57
3.5	Caractérisation des bétons à l'état durcis.....	59
3.5.1	Méthodologie de l'UPV (Ultrasonic Pulse Velocity).....	59
3.5.2	Résistance à la compression	60
3.5.3	Résistance à la flexion	61
3.5.4	Porosité accessible à l'eau.....	62

3.6	Conclusion.....	63
-----	-----------------	----

CHAPITRE .4. PROPRIETES DES DIFFERENTS BETONS

4.1	Introduction.....	64
4.2	Caractérisation des bétons à l'état frais.....	64
4.2.1	BO et BOCs.....	64
4.2.1.1	L'ouvrabilité.....	64
4.2.1.2	Teneur en air & Masse volumique à l'état frais M_{vf}	65
4.2.2	BAP et BAPCs	66
4.2.2.1	Essai d'étalement au cône d'Abrams	66
4.2.2.2	Essai de la boîte en L	67
4.2.2.3	Essai de stabilité au tamis	68
4.2.2.4	La teneur en air & Masse volumique à l'état frais M_{vf}	69
4.3	Caractérisation des bétons à l'état durci.....	70
4.3.1	Résistance à la compression.....	70
4.3.1.1	Influence du type et âge du béton (cure dans l'eau).....	70
4.3.2	Résistance à la flexion.....	72
4.3.3	Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente	73
4.3.4	Durabilité (attaques de Na_2SO_4 et l'eau de mer).....	75
4.4	Conclusion.....	80

CHAPITRE .5. CARACTERISATION ET CORRELATIONS

ULTRASONIQUES DES DIFFERENTS BETONS

5.1	Introduction.....	82
5.2	Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques	82
5.2.1	Influence de type de béton.....	82
5.2.2	Influence de l'âge des bétons	85
5.2.3	Influence des fréquences et diamètres des transducteurs	86
5.2.4	Influence des attaques des milieux agressives	88
5.3	Comparaison entre l'évolution des vitesses ultrasoniques et des résistances à la compression.....	95
5.3.1	Influence du type de béton.....	95
5.3.2	Influence d'âge.....	96

5.3.3	Influence des attaques de Na_2SO_4 et de l'eau de mer.....	96
5.4	Estimation des propriétés des bétons par les vitesses ultrasoniques.....	97
5.4.1	Corrélations entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression	97
5.4.2	Corrélations entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la flexion	104
5.4.3	Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la porosité	105
5.4.4	Corrélations entre la vitesse ultrasonique et la masse volumique apparente.....	108
5.5	Conclusion.....	110
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	112

RÉFÉRENCES

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1.	Illustration de la connectivité.....	8
Figure 1.2.	Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow).....	12
Figure 1.3.	Essai de la boîte en L (L-box test).....	12
Figure 1.4.	Essai de stabilité au tamis.....	13
Figure 1.5.	Cas d'une décharge des pneus usés (stockage à l'air libre).....	15
Figure 1.6.	Zone de transition interfaciale entre «pâte de ciment et granulat de caoutchouc» et entre «pâte de ciment et granulat de sable naturel».....	20
Figure 2.1.	Échelle des ondes élastiques.....	28
Figure 2.2.	Propagation et polarisation des ondes de volume.....	29
Figure 2.3.	Propagation et polarisation des ondes de surface.....	29
Figure 2.4.	Champs proche et lointain.....	31
Figure 2.5.	Diagramme schématique du circuit d'essai de vitesse d'impulsion	34
Figure 2.6.	Configurations de mesure de vitesse d'impulsion	36
Figure 2.7.	Effet du rapport E/C sur la vitesse ultrasonique	39
Figure 2.8.	Évolution temporelle des vitesses ultrasonique.....	40
Figure 2.9.	Relation entre la vitesse ultrasonique et teneur en eau.....	41
Figure 2.10.	Effet du teneur en air sur la vitesse ultrasonique.....	42
Figure 2.11.	Relation entre UPV et de résistance à la compression.....	44
Figure 2.12.	Variation du vitesse ultrasonique en fonction de la porosité.....	45
Figure 2.13.	Vitesse de phase en fonction du pourcentage de fissures incluse dans le béton.....	47
Figure 3.1.	Distribution granulométriques des granulats.....	51
Figure 3.2.	Granulats utilisées.....	51
Figure 3.3.	Filler de calcaire	52
Figure 3.4.	Caractérisation du BO et BOCs à l'état frais	54
Figure 3.5.	Caractérisation du BAP et BAPCs à l'état frais.....	56
Figure 3.6.	Formes des éprouvettes utilisées	58
Figure 3.7.	Les trois modes de cure.....	58
Figure 3.8.	Dispositif ultrasonique et transducteurs utilisées.....	59

Figure 3.9. Position des transducteurs, mode de transmission direct.....	60
Figure 3.10. Essai de résistance à la compression.....	61
Figure 3.11. Essai de résistance à la flexion.....	61
Figure 3.12. Essai de porosité accessible à l'eau.....	62
Figure 4.1. Affaissement des BO et BOCs.....	65
Figure 4.2. Teneur en air & Masse volumique à l'état frais MV_f des BO et BOCs.....	66
Figure 4.3. Etalement des BAP et BAPCs.....	67
Figure 4.4. Rapport H_2/H_1 pour l'essai de la boîte en L des BAP et BAPCs.....	68
Figure 4.5. Stabilité au tamis des BAP et BAPCs.....	68
Figure 4.6. Teneur en air & Masse volumique à l'état frais MV_f des BAP et BAPCs...	69
Figure 4.7. Résistance à la compression des différents types de béton à 28, 90 et 180 jours (Cure dans l'eau).....	71
Figure 4.8. Résistance à la flexion des différents types de béton à 28 jours.....	72
Figure 4.9. Porosité et masse volumique apparente des BO et BOCs à 28 jours.....	74
Figure 4.10. Porosité et masse volumique apparente des BAP et BAPCs à 28 jours.....	75
Figure 4.11. L'apparence des éprouvettes selon le milieu de conservation.....	76
Figure 4.12. Résistance à la compression des différents types de béton bétons après immersion dans une solution de Na_2SO_4	78
Figure 4.13. Résistance à la compression des différents types de béton après immersion dans l'eau de mer.....	79
Figure 5.1. Evolution des vitesses ultrasoniques des différents bétons – transducteurs A-.....	84
Figure 5.2. Evolution des vitesses ultrasoniques des différents bétons – transducteurs B-.....	85
Figure 5.3. Evolution des vitesses ultrasoniques des différents bétons – transducteurs C-.....	85
Figure 5.4. Effet du type des transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques (BO et BOCs).....	87
Figure 5.5. Effet du type des transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques (BAP et BAPs).....	87

Figure 5.6. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs A) des bétons après immersion dans une solution de Na ₂ SO ₄	90
Figure 5.7. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs B) des bétons après immersion dans une solution de Na ₂ SO ₄	90
Figure 5.8. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs C) des bétons après immersion dans une solution de Na ₂ SO ₄	91
Figure 5.9. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs A) des bétons après immersion dans l'eau de mer	93
Figure 5.10. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs B) des bétons après immersion dans l'eau de mer	94
Figure 5.11. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs C) des bétons après immersion dans l'eau de mer	94
Figure 5.12. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BO et BOCs (cure dans l'eau).....	98
Figure 5.13. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BAP et BAPCs (cure dans l'eau).....	98
Figure 5.14. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons (cure dans l'eau).....	99
Figure 5.15. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BO et BOCs (cure dans Na ₂ SO ₄).....	100
Figure 5.16. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BAP et BAPCs (cure dans Na ₂ SO ₄).....	101
Figure 5.17. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons (cure dans Na ₂ SO ₄).....	101
Figure 5.18. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BO et BOCs (cure dans l'eau de mer).....	102
Figure 5.19. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BAP et BAPCs (cure dans l'eau de mer).....	103
Figure 5.20. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons (cure dans l'eau de mer).....	103
Figure 5.21. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la flexion des BO et BOCs.....	104

Figure 5.22. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la flexion des BAP et BAPCs.....	104
Figure 5.23. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la flexion des différents bétons.....	105
Figure 5.24. Corrélations entre les vitesses et les porosités des BO et BOCs.....	106
Figure 5.25. Corrélations entre les vitesses et les porosités des BAP et BAPCs.....	107
Figure 5.26. Corrélations entre les vitesses et les porosités des différents bétons.....	107
Figure 5.27. Corrélations entre les vitesses et les masses volumiques des BO et BOCs...	108
Figure 5.28. Corrélations entre les vitesses et les masses volumiques des BAP et BAPCs	108
Figure 5.29. Corrélations entre les vitesses et les masses volumiques des différents bétons.....	109

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1. Caractéristiques chimiques et physiques du ciment utilisé.....	50
Tableau 3.2. Caractéristiques des granulats utilisés.....	51
Tableau 3.3. Caractéristiques du filler de calcaire utilisé.....	52
Tableau 3.4. Composition du BO et des BOC	54
Tableau 3.5. Compositions du BAP et des BAPCs.....	55
Tableau 3.6. Caractéristiques de différents transducteurs utilisés.....	60
Tableau 4.1. Propriétés des BO et des BOCs à l'état frais.....	64
Tableau 4.2. Propriétés du BAP et des BAPCs à l'état frais.....	66
Tableau 4.3. Résistance à la compression des différents bétons (cure dans l'eau).....	70
Tableau 4.4. Résistance à la flexion des différents bétons.....	72
Tableau 4.5. Porosité et masse volumique apparente des différents bétons.....	73
Tableau 4.6. Résistance à la compression des différents bétons dans des milieux agressifs.....	76
Tableau 5.1. Vitesses ultrasoniques des différents bétons - cure dans l'eau-.....	83
Tableau 5.2. Vitesses ultrasoniques des différents bétons immergés dans Na ₂ SO ₄	89
Tableau 5.3. Vitesses ultrasoniques des différents bétons immergés dans l'eau de mer.....	92

INTRODUCTION
GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. La simplicité de sa fabrication et de sa mise en place, son faible prix de revient et les performances mécaniques et de durabilité qu'il assure ont légitimé son utilisation pour réaliser les ouvrages les plus divers. En plus du béton ordinaire BO, d'autres familles de béton, relatives à certaines applications, ont vu ensuite le jour comme le béton autoplaçant BAP qui constitue davantage une nouvelle technologie de construction. Les principaux avantages des BAP sont liés à leur mise en place qui ne nécessite pas l'apport de vibration.

L'épuisement des gisements naturels de granulats et les difficultés pour mettre en place de nouvelles carrières imposent de rechercher de nouvelles sources d'approvisionnement. Parmi ces sources la réutilisation et la valorisation des déchets et sous-produits industriels est une piste à exploiter. Les déchets de pneus sont parmi les déchets qui peuvent permettre leur réutilisation dans l'ingénierie civile. Même si l'incorporation des granulats de caoutchouc issus de pneus usagés dans les matériaux cimentaires est préjudiciable à leurs résistances mécaniques, en contrepartie elle leur permet une plus grande capacité de déformation.

Les méthodes d'essai non destructif (END) sont utilisées pour déterminer les propriétés et l'état du béton en place, sans causer aucun dommage structurellement significatif au béton.

La méthode de la vitesse des impulsions ultrasoniques est l'une de ces méthodes qui est utilisée pour évaluer la qualité du béton (en laboratoire ou sur le terrain).

La simplicité des procédures de cette technique et la disponibilité des équipements sur le marché renforce l'utilité de cette méthode.

La méthode de la vitesse des impulsions ultrasoniques peut être utilisée pour détecter les fissures internes et autres défauts ainsi que les changements de propriétés dans le béton. Elle est également utilisée pour estimer la résistance des bétons. Cette méthode est utile pour surveiller le béton subissant des changements structurels sur une longue période de temps. Donc, l'utilisation de ces méthodes d'évaluation s'avère indispensable lorsqu'il s'agit d'ouvrages existants et en fonctionnement et permet de suivre leurs évolutions au cours du temps.

Cette méthode est basée sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion d'ondes ultrasonores sur une longueur de trajet connue qui peut être utilisé pour obtenir la vitesse acoustique d'un matériau donné.

Une onde ultrasonique traversant le béton interagira avec n'importe quel obstacle sur son chemin. Les changements mesurés des caractéristiques de propagation des ondes peuvent être attribués aux propriétés des matériaux ou des caractéristiques structurelles du béton.

Dans la mesure où un grand nombre de variables affectent les relations entre les propriétés du béton et sa vitesse d'impulsion, l'utilisation de cette dernière pour estimer ces propriétés n'est pas recommandée sauf si des tests de corrélation préalables ont été effectués.

La propagation des ondes est un phénomène physique qui traduit la progression d'une onde ainsi que son évolution dans un matériau. L'étude de la propagation d'ondes mécaniques dans le béton est complexe car elle met en jeu divers phénomènes couplés ; hétérogénéités de différentes natures (ciment, sable, granulats, pores), porosité, saturée ou non.

La connaissance fine de la propagation des ondes dans le béton et les avantages qu'elle pourra apporter sur le point de vue théorique deviennent essentiels pour envisager des contrôles sur site et faire des choix de procédures ou de paramètres de contrôle.

L'objectif de cette thèse est d'approfondir les connaissances générales de la propagation des ondes ultrasonores dans le matériau béton et de contribuer à développer des outils de caractérisation des propriétés et de durabilité des bétons par les ondes ultrasonores. Ces outils se rapportent aux corrélations obtenues pour estimer les propriétés des différents bétons, aussi bien dans leur état sain que dégradé, à partir des vitesses des pulsations ultrasoniques.

Ce manuscrit de thèse est structuré en cinq chapitres. Les deux premiers chapitres du mémoire sont consacrés à une étude bibliographique. Le premier chapitre est consacré aux propriétés du matériau béton à travers sa composition, sa formulation, ses propriétés mécaniques, ainsi que la durabilité au travers des différentes dégradations. En plus du béton ordinaire, deux autres types de béton font l'objet de ce chapitre, à savoir le béton autoplaçant et le béton contenant des granulats de caoutchouc.

Le deuxième chapitre s'intéresse à la méthode des propagations des ondes ultrasoniques dans l'évaluation non destructive des bétons. On commence par l'importance et la nécessité de cette méthode dans le domaine du génie civil, ensuite on présente des notions générales sur les ondes ultrasonores, le phénomène de propagation d'ondes mécaniques, le faisceau ultrasonique, les types de configuration, équipement et procédures de mesure, les grandeurs caractéristiques de la propagation d'ondes ultrasoniques. Enfin la potentialité des méthodes ultrasonores pour l'évaluation des bétons y compris les facteurs affectant la vitesse ultrasonique et les caractérisations des propriétés et dommages des bétons par cette méthode sont présentés.

Dans le troisième chapitre, on présente dans un premier temps la caractérisation des matériaux de base pour la confection des bétons envisagés, puis les dispositifs et techniques expérimentaux utilisés dans cette étude. Ce programme expérimental se compose des essais de caractérisation des différents bétons à l'état frais, et des essais pour la caractérisation des bétons à l'état durci. Ces derniers essais s'articulent sur des essais non destructifs (les essais ultrasoniques) ensuite sur des essais destructifs (essais de compression et flexion, porosité accessible et de mesure de la masse volumique apparente des différents bétons).

Les résultats et les discussions de ces essais sont présentés dans les chapitres quatre et cinq. Le quatrième chapitre traite des propriétés des bétons ordinaires et des BAP à l'état frais et durci ainsi que l'interprétation des évolutions de leurs propriétés provoquées par la substitution du sable par des granulats de caoutchouc. Ces substitutions ont concerné quatre volumes (5, 10, 15 et 20%).

Quant au cinquième chapitre, il est consacré à la caractérisation non destructive par les ultrasons. On s'intéresse à l'influence de quelques paramètres sur l'évolution de la vitesse ultrasonique (le type de béton, l'âge de cure, diamètre et fréquence des transducteurs, et l'effet des milieux agressifs (Na_2SO_4 et eau de mer)). Ce chapitre est terminé par l'étude des corrélations des différentes propriétés des bétons étudiés avec les vitesses ultrasoniques et des courbes de régression sont proposées pour les différentes propriétés.

Une conclusion générale tirée de ce travail a été présentée en fin du mémoire prouvant la fiabilité de l'utilisation de la méthode non destructive des vitesses ultrasoniques pour estimer les propriétés des différents types de bétons. Le document se termine en dégageant quelques perspectives pour les différents aspects de la propagation des ondes ultrasoniques dans le béton, et dans les matériaux hétérogènes en général.

CHAPITRE 1

PROPRIETES ET DURABILITE

DES VARIETES DE BETON

1.1 Introduction

Le béton est l'un des matériaux de construction importants utilisés dans le monde dans tous les travaux d'ingénierie. Il est utilisé dans le secteur de la construction depuis longtemps et a prouvé qu'il s'agit d'un matériau bon marché et que ses constituants sont largement disponibles dans la nature. La qualité du béton est déterminée par ses propriétés mécaniques ainsi que par sa capacité à résister à la détérioration [1]. Les dernières décennies ont vu la naissance de nouveaux bétons dont la composition évolue en fonction des caractéristiques mécaniques souhaitées, ou encore selon l'environnement du futur ouvrage. Certains adjuvants peuvent ainsi entrer dans la composition d'un béton afin d'en modifier ses propriétés [2]. Ces nouveaux bétons, qui seront ordinaires demain, vont modifier les modes de conception et de construction du génie civil.

1.2 Le matériau Béton

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde du génie civil, grâce à ses nombreux avantages techniques et économiques : bonne résistance mécanique, haute durabilité, bonne adaptation aux environnements, facilité de mise en œuvre, coût faible et disponibilité des matières premières. Il s'agit d'un matériau hétérogène composé de ciment, de l'eau et des granulats (sables et graviers). D'autres éléments qui permettent de modifier les propriétés physiques et mécaniques du mélange, appelés adjuvants et additions, peuvent être ajoutés dans le mélange [3].

1.2.1 Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique. On entend par là une substance qui, mélangée à l'eau, est capable de durcir progressivement par la réaction chimique d'hydratation aussi bien à l'air que sous l'eau. La pâte de ciment durcie présente une résistance mécanique élevée et ne se dissout pas dans l'eau [4]. C'est un mélange – qui se présentant sous la forme d'une poudre très fine – de silicates et d'aluminates de calcium, résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec de la silice (SiO₂), de l'alumine (Al₂O₃), et de l'oxyde de fer (Fe₂O₃). Le ciment Portland, mélange de poudre de clinker (constitué essentiellement de silicates de calcium) et de gypse (sulfate de calcium), est de loin le plus utilisé dans la fabrication du béton [3].

Le ciment ainsi obtenu peut également offrir une très grande variabilité, qui dépend de la provenance des matériaux, des adjuvants utilisés au cours de la fabrication et des dosages entre les différents constituants [2].

Le dosage en ciment dépend de plusieurs critères tels que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les actions environnementales auxquelles le béton est soumis. La norme NF EN 206-1 fournit les dosages minimaux à respecter selon les classes d'exposition des bétons, en fonction des actions environnementales (humidité, milieu marin, agressions chimiques, cycles gel-dégel) [5].

1.2.2 Eau de gâchage

L'eau joue un double rôle dans la technologie du béton. D'une part, elle est nécessaire au durcissement du ciment, puisque la réaction chimique du ciment (hydratation) est induite par l'eau. D'autre part, elle est indispensable pour assurer l'ouvrabilité et une mise en place correcte du béton frais [4]. Le rapport E/C est un facteur critique du béton et il est déterminé selon les caractéristiques mécaniques souhaitées ou l'environnement des ouvrages : une valeur faible va couramment réduire la porosité et augmenter la résistance du béton, tandis qu'une valeur élevée apporte une bonne facilité de mise en œuvre du béton frais [3].

1.2.3 Les granulats

On désigne en général par granulats des graviers et des sables naturels, mais aussi des matériaux granulaires produits industriellement (par exemple des granulats légers comme l'argile expansée) ainsi que des matériaux recyclés, résultant de la démolition d'ouvrages. Ils constituent le squelette du béton et représentent dans les cas usuels, 70 à 80% de la masse totale du béton. Les propriétés du béton frais et celles du béton durci, comme la résistance à la compression et la durabilité, dépendent des propriétés des granulats utilisés [4].

Les granulats doivent satisfaire notamment deux exigences :

- La propreté, particulièrement importante pour les sables ; la teneur en fines argileuses est strictement limitée ;
- La granulométrie, propriété géométrique essentielle d'un granulat, dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact [6].

La distribution des granulats au sein du béton est réalisée de façon à être la plus continue possible afin d'assurer la meilleure compacité possible. Ceci va contribuer à la diminution des

espaces entre grains, favorisant la réaction d'hydratation et améliorer les propriétés mécaniques du béton [2].

1.2.4 Adjuvants

Les adjuvants sont des substances qui peuvent, par leur action physique et/ou chimique, changer les caractéristiques du béton (plastifiant, super-plastifiant, entraîneur d'air, accélérateur de prise...etc). En fonction du type d'adjuvant utilisé, il est possible d'influencer de manière ciblée les caractéristiques du béton frais (le temps de prise, le processus de durcissement et l'ouvrabilité), ou les caractéristiques du béton durci (la résistance et la durabilité). En règle générale, les adjuvants pour bétons sont introduits sous forme liquide et en très petites quantités, lors du malaxage. Leur pourcentage en masse par rapport au ciment se situe normalement entre 0,2 et 2% [7].

1.2.5 Les additions

Les additions sont généralement des ajouts minéraux sous forme de poudre fine qui peuvent améliorer certaines propriétés du béton, en particulier l'ouvrabilité du béton frais ainsi que les caractéristiques mécaniques et la compacité du béton durci. Contrairement aux adjuvants, les additions sont toujours incorporées au béton en quantités suffisamment importantes. La norme EN 206-1 distingue deux types d'additions : celles du type I sont des substances inertes (le filler calcaire et les pigments), qui n'engendrent pas de réaction chimique, ils complètent et améliorent le squelette granulaire du béton en raison de leur finesse et de la forme de leurs grains, ainsi que de leur granularité. Et celles du type II qui sont désignées comme additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent. Ces derniers comprennent notamment les cendres volantes de houille et la fumée de silice qui, grâce à la réaction pouzzolanique qu'elles induisent, contribuent à la montée en résistance de la pâte de ciment [7].

1.2.6 Formulation des bétons

Les bétons sont conçus suivant une formulation, donnée sous forme de quantité massique de chaque composant afin d'obtenir un volume de 1 m³ de béton. Il existe différentes méthodes de formulations, qui visent à optimiser l'empilement des différentes particules (ciment, sable, gravillons) afin de minimiser les espaces vides [8]. Les différents modèles de formulation du béton, parmi lesquels le plus largement diffusé est le modèle de Dreux-Gorisse [1], ont tous les mêmes objectifs : l'amélioration de l'ouvrabilité du béton, la résistance du béton solide ainsi que sa durabilité [2].

1.3 Propriétés mécaniques du béton

La diversité de formulation du béton, la qualité des constituants et les conditions de fabrication conduisent à des caractéristiques mécaniques des bétons très variables.

On caractérise généralement les bétons par leur résistance à la compression, généralement déterminée après 28 jours de cure. Des essais de compression du béton peuvent être effectués sur des éprouvettes cylindriques ou cubiques, sont mesurés par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale.

La résistance en traction traduit généralement la capacité de résistance à la fissuration du béton. La valeur de résistance en traction est environ dix fois plus faible que la valeur en compression. Cette résistance est classiquement mesurée sur des éprouvettes cylindriques suivant la technique du fendage ou par des essais de flexion sur des éprouvettes prismatiques.

La résistance mécanique est influencée par les facteurs suivants :

- La qualité du ciment caractérisée par sa classe de résistance : plus celle-ci est élevée, plus la résistance du béton est importante ;
- Les dosages en ciment et en eau représentés par leur rapport E/C (Eau/Ciment) : la résistance croît quand E/C décroît ;
- La qualité et la quantité des granulats par la proportion relative sable/gravier mais aussi la forme et la taille des granulats ;
- La température et l'humidité : surtout lors de la phase de durcissement [9].

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité. Elle correspond au rapport entre le volume des vides (pores, fissures et microfissures) présents dans le matériau et le volume total de ce dernier. Elle influe directement la résistance des structures ainsi que leur durabilité. Elle est directement issue de la formulation du béton, et des réactions chimiques qui ont ensuite lieu jusqu'à la formation du béton.

Un milieu poreux se compose d'une matrice solide (granulats, pâte de ciment) et d'un espace de vides. Les pores ou vides qui sont remplis d'air et (ou) d'eau, forment un espace poreux de forme géométrique très complexe et constitué de :

- Pores interconnectés : les vides sont connectés entre eux (porosité ouverte), et c'est ce milieu poreux qui participe au transport des matières et des agents agressifs.
- Pores isolés ou non connectés : les vides ne communiquent pas entre eux (porosité fermé).
- Pores aveugles ou bras morts : les vides sont connectés d'un seul côté et sont

accessibles mais ne permettent pas d'échange.

Il est préférable dans un béton que les pores présents soit les plus petits possibles, avec une connectivité faible (Figure 1.1). Une perméabilité de la pâte de ciment suffisamment basse assure une fonction d'étanchéité et limite le transfert des liquides, gaz, ou ions potentiellement agressifs au cœur du béton [2].

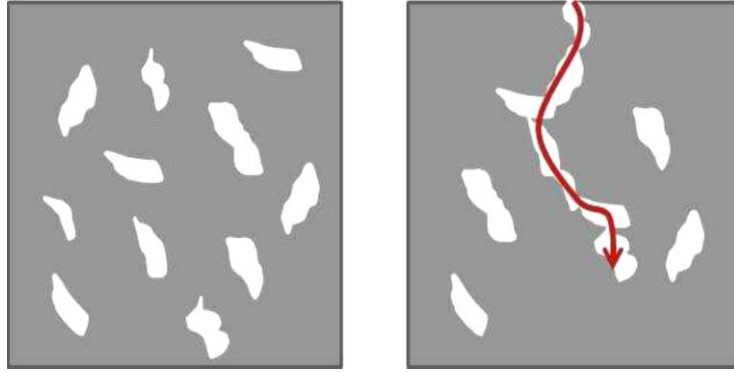


Figure 1.1. Illustration de la connectivité.

1.4 Les bétons aux nouvelles performances

Les recherches sur les nouveaux bétons sont considérablement accélérées et ont abouti aux solutions les plus innovants tant en termes de conception que de mise en œuvre et d'esthétisme. Les bétons s'adaptent désormais à toutes les exigences des concepteurs, aux contraintes des chantiers et aux agressions de l'environnement. Au fil des années, les caractéristiques du béton se sont complexifiées pour répondre à des utilisations de plus en plus diversifiées, à des résistances toujours plus importantes, à des exigences de durabilité plus fortes, à des contraintes esthétiques et à de nouvelles exigences de mise en œuvre. Les recherches sur l'amélioration des propriétés physiques et mécaniques ont abouti à la mise au point des bétons à Hautes Performances (BHP), bétons à Très Hautes Performances (BTHP), Bétons autoplaçants (BAP), Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances (BFUP) ...etc.

De point de vue écologique, et dans le but de réduire la consommation de ressources naturelles ainsi que d'éviter le dépôt des matériaux de démolition dans les décharges, les recherches permettent d'offrir des bétons de recyclage en utilisant des produits recyclés tels que les déchets et les matériaux de démolition...etc. [6]

Parmi ces nouveaux bétons, et en plus du béton classique, nous nous intéressons dans cette étude aux bétons autoplaçants et les bétons de recyclages qui sont détaillées ci-dessous.

1.4.1 Bétons autoplaçants

La caractéristique principale des BAP est leur très grande fluidité combinée à une importante viscosité. Ils mettent en place et se serrent sous le seul effet de la gravité, sans apport de vibration, même dans des coffrages très ferrailés. Ces bétons ne sont évidemment qualifiés d'autoplaçants que si le matériau durci final présente des propriétés homogènes (sans ségrégatio [10]).

Ces bétons sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate :

- densités de ferrailage importantes ;
- formes et géométries complexes ;
- voiles minces et de grande hauteur, piles de ponts, etc. ;
- exigences architecturales et qualité des parements particulières ;
- accès difficiles voire impossible pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration [6].

Pour atteindre les caractéristiques requises des bétons autoplaçants (fluidité, homogénéité et stabilité), plusieurs méthodes de formulations existent aujourd'hui.

La méthode Japonaise développée par Okamura et Ozawa est l'une des premières méthodes mises au point pour la formulation des bétons autoplaçants [11, 12]. Le principe de la méthode est l'augmentation du volume de pâte au détriment du volume des granulats. Ce principe vise à éviter tout problème de blocage des gravillons en imposant un volume de gravillons inférieur à 50 % au volume solide du béton et un volume de sable égal à 40 % du volume total du mortier du béton. D'autres méthodes ont été proposées comme celle développée au CTG (Centre Technique Groupe, Italcementi) qui repose sur le développement d'un fuseau granulaire propre aux BAP à étalement compris entre 55 et 75 cm.

Il reste que, pour l'instant, il n'existe pas des méthodes de formulations pour les BAP généralisées, comme pour les bétons ordinaires.

Pour cela, les formalisations des BAP nécessitent un programme expérimental assez conséquent pour fixer la nature et les proportions des composants de la pâte qui assurera la consistance nécessaire pour limiter la ségrégation et assurer une bonne fluidité [13].

Un BAP doit également pouvoir s'écouler, sans apport de vibration, au travers de zones confinées (dans un coffrage très ferrailé). Lors de l'écoulement d'un BAP, et malgré sa grande fluidité, des voûtes peuvent se former par contacts solides, se colmater avec des parties fines, et interrompre l'écoulement fluide si le mortier n'est pas assez résistant au cisaillement.

Un BAP doit avoir aussi une bonne résistance à la ségrégation statique (une fois mis en place) jusqu'à sa prise, pour des raisons évidentes d'homogénéité de ses propriétés mécaniques. Pour cela, la principale difficulté auquel le formulateur de BAP est confronté est de pouvoir concilier ces propriétés à priori contradictoires [14].

1.4.1.1 Influence des paramètres de formulation sur les propriétés à l'état frais

Les bétons autoplaçants (BAP) se distinguent des bétons dits ordinaires (BO), par leurs propriétés à l'état frais. Les composants de base du BAP sont identiques à ceux du béton traditionnel (un même dosage en ciment et en eau que les BO, ainsi qu'un volume de sable assez proche). Cependant, leur formulation et le contrôle de leurs propriétés lors de la mise en œuvre nécessitent une attention particulière [15].

Malgré les différentes méthodes de formulation existantes qui sont conçues de manière empirique, certaines caractéristiques demeurent intrinsèques aux BAP mais peuvent légèrement différer d'une approche à l'autre.

a) Un volume de pâte élevé

Les frottements entre granulats sont source de limitations vis-à-vis de l'étalement et de la capacité au remplissage des bétons. Le rôle de la pâte étant précisément de limiter les contacts entre les différents gravillons et d'empêcher la formation de voûtes susceptible de bloquer l'écoulement, son volume dans les BAP est donc élevé (330 à 400 l/m³) [14].

b) Une quantité de fines élevée

Pour leur assurer une maniabilité suffisante tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage, les BAP contiennent une quantité de fines supérieure à celle des bétons conventionnels (de l'ordre de 500 kg/m³). Ces fines proviennent du ciment, des additions et des granulats [14].

c) Un faible volume de gravillon

En général, il est à adopté un rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 dans les BAP. Le diamètre maximal D_{\max} des gravillons dans un BAP est compris entre 10 et 20 mm. Les risques de blocage pour un confinement donné augmentent lorsque D_{\max} augmente, ce qui conduit à diminuer le volume de gravillon [14].

d) L'utilisation des adjuvants

Les adjuvants les plus utilisés dans les BAP sont les superplastifiants et les agents de viscosité. L'apparition des bétons autoplaçants et des bétons à hautes performances (BHP) est fortement liée aux progrès réalisés dans le domaine des adjuvants et plus particulièrement celui des superplastifiants (SP). L'utilisation de superplastifiant permet de concilier la diminution de la teneur en eau et la fluidité du béton tout en conservant de bonnes performances mécaniques du matériau [13]. Les BAP contiennent la plupart du temps un agent de viscosité. Ces produits sont des polymères qui ont été développées pour éviter le délèvement à l'état frais des bétons coulés sous l'eau.

e) L'utilisation des additions

Pour augmenter la quantité de pâte d'un BAP, on peut alors envisager d'augmenter la quantité de ciment. Or ceci conduirait à une augmentation significative du coût du matériau mais également à des problèmes de retrait dus à l'élévation de la température lors de l'hydratation du ciment. Il est donc nécessaire de remplacer une partie du ciment par des additions minérales. Différentes additions sont citées dans la littérature : cendres volantes, laitiers de hauts fourneaux, fumées de silice et fillers calcaires [15].

Les fillers calcaires sont les plus utilisés pour des raisons de coût essentiellement [16]. Leur utilisation permet par définition de combler les vides entre les grains de dimensions plus importantes du ciment. L'utilisation d'un filler plus fin conduit à la réduction de la demande en eau et la quantité de superplastifiant pour la formulation d'un béton autoplaçant. Elles améliorent également les résistances mécaniques des mélanges cimentaires. Cet effet positif dépend fortement du dosage et de la finesse des fillers [17].

1.4.1.2 Caractérisation d'un béton autoplaçant à l'état frais

Le comportement d'un BAP à l'état frais se différencie notablement de celui d'un béton ordinaire. Donc la formulation d'un tel béton est plus complexe que celle d'un béton traditionnel et implique une composition spécifique. Trois essais de caractérisation des bétons autoplaçants à l'état frais ont été recommandés par l'Association Française de Génie Civil « AFGC » [14]. Initialement provisoires, ces recommandations sont devenues par la suite des essais de référence pour valider une formule de BAP.

L'ouvrabilité des bétons autoplaçants se décompose en trois caractéristiques principales :

- Mobilité en milieu non confiné (décrit par l'essai d'étalement au cône d'Abrams),

- Mobilité en milieu confiné (décrit par l'essai d'écoulement à la boîte en L),
- Stabilité (résistance à la ségrégation décrite par l'essai de stabilité au tamis) [13].

1.4.1.2.1 Mobilité en milieu non confiné (essai d'étalement au cône d'Abrams)

L'essai d'étalement au cône d'Abrams, permettant de caractériser la mobilité en milieu non confiné (Figure 1.2) est l'essai le plus facile à mettre en œuvre. Deux indicateurs de cet essai, le diamètre moyen (moyenne sur deux diamètres orthogonaux) de la galette de béton obtenue au bout d'une minute, ainsi que le temps nécessaire à l'obtention d'une galette de 50 cm de diamètre. Cette dernière valeur donne une indication sur la viscosité du matériau. D'autres essais permettent d'évaluer la mobilité du béton en milieu non confiné comme celui de l'entonnoir en forme de V (V funnel) [18].

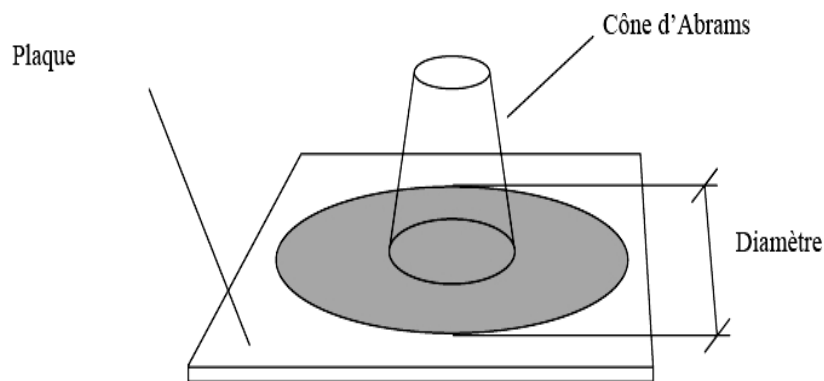


Figure 1.2. Essai d'étalement au cône d'Abrams (slump flow) [18].

1.4.1.2.2 Mobilité en milieu confiné (essai de la boîte en L (Lbox))

La boîte en L permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné (la ségrégation dynamique) et de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage inacceptables en amont des armatures.

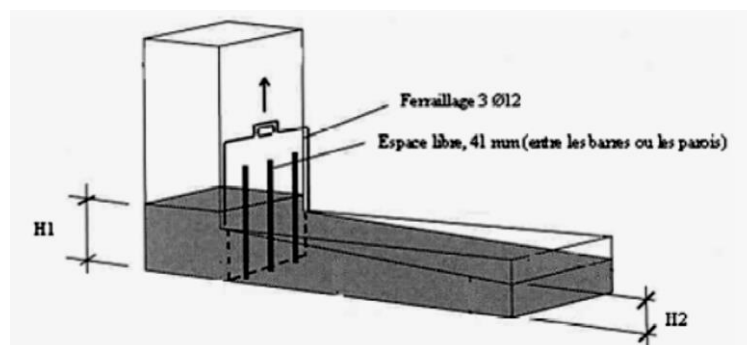


Figure 1.3. Essai de la boîte en L (L-box test).

Lorsque le béton s'écoule mal à travers le ferrailage et qu'il se produit un amoncellement de granulats en amont de la grille, c'est le signe d'un problème de blocage ou de ségrégation. [14]. Les essais du tube en U, du caisson et de la passoire et J-ring test permettent aussi de caractériser la ségrégation dynamique et donnent un autre aspect de la capacité de remplissage des BAP [9].

1.4.1.2.3 Stabilité (Essai de stabilité au tamis)

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation du BAP. Cet essai complète les essais permettant d'apprécier la mobilité, en milieu confiné ou non, en caractérisant la stabilité.

Il consiste à évaluer le pourcentage en masse de laitance (P_{laitance}) d'un échantillon de béton ($4,8 \pm 0,2$ kg) passant à travers un tamis de 5 mm.

$$P_{\text{laitance}} (\%) = \frac{P_{\text{laitance}} \times 100}{P_{\text{échantillon}}} \quad (1.1)$$



Figure 1.4. Essai de stabilité au tamis.

1.4.1.3 Propriétés du BAP à l'état durci

Les particularités de composition des bétons autoplacants conduisent à étudier les différentes propriétés mécaniques de ces bétons supposées différentes de celles des bétons vibrés.

1.4.1.3.1 Résistance à la compression

Les adjuvants utilisés dans les formulations des BAP ont des implications sur ces résistances mécaniques. L'introduction d'un agent de viscosité peut diminuer sensiblement la résistance mécanique d'un BAP aux jeunes âges [19]. Par contre, les superplastifiants ont pour effets secondaires de retarder le temps de prise et d'augmenter le développement de la résistance mécanique au jeune âge [20, 21].

L'effet des fillers calcaires sur l'évolution de la résistance mécanique est étudié dans différentes recherches [22, 23]. Une accélération de sa résistance mécanique aux jeunes âges et cela jusqu'à 28 jours puis deviennent moins significatifs par la suite. Cela due à une hydratation favorisée du ciment, principalement par un effet physique, et conduisent à une matrice cimentaire dont la structure est plus dense.

Le volume de la pâte influe aussi la résistance à la compression [24, 25]. Parallèlement au volume de pâte, le rapport E/L est un des facteurs les plus influents sur la résistance en compression.

1.4.1.3.2 Module d'élasticité

Le module d'élasticité est fonction de la résistance en compression des bétons d'après l'Eurocode [26]. Donc, à résistance égale, un BAP devrait avoir le même module qu'un béton vibré. Or, si ceci est vrai dans certains cas à la précision des mesures près [27, 28]. D'autres auteurs indiquent que les modules des BAP sont plus faibles que ceux des bétons vibrés [24, 29]. D'autres paramètres influencent le module d'élasticité. Turcry et al. [25] montrent qu'une augmentation du volume de pâte conduit à une diminution du module des BAP. Mais, selon ces mêmes auteurs, l'influence du volume sur le module est négligeable.

1.4.2 Béton de recyclage

L'accumulation de déchets non biodégradables constitue une source potentielle de problèmes environnementaux et économiques majeurs. Cette accumulation est liée à l'explosion démographique des pays en voie de développement accompagnée d'une urbanisation incontrôlée qui favorisent une production importante de déchets [30]. D'autre part, le monde connaît une grave pénurie des granulats naturels utilisés dans la fabrication du béton.

Une excellente opportunité dans le domaine de génie civil est de réduire la consommation abusive des granulats naturels non renouvelables et l'élimination des déchets en quantités croissantes. La solution passe par un remplacement même partiel des granulats naturels par des granulats recyclés issus des déchets. Le recyclage se pose comme concept environnemental et économique à la fois [31]. L'emploi des granulats recyclés dans le domaine de génie civil est diversifié dont la confection de nouveaux bétons de bâtiment, les travaux de routes, la fabrication de ciment etc. [30]

Pour la production du béton, différents types de déchets sont utilisés à des fins différentes telles que le remplacement des granulats, le remplacement partiel du ciment...etc. En fonction

de leurs propriétés, les déchets sont divisés en matériaux réactifs (cendres volantes, fumée de silice, pouzzolane d'argile calcinée, laitier de haut fourneau) et inertes (déchets de construction et de démolition, déchets de marbre, déchets de calcaire, déchets plastiques, déchets des pneus usagés ...etc.) [32].

Une partie des travaux présentés dans ce document portent sur l'incorporation des déchets des pneus usagers dans le béton.

1.4.2.1 Recyclage des pneus

Dans le monde entier, s'agissant de l'industrie automobile, l'utilisation des pneus en caoutchouc augmente chaque année. Les pneumatiques sont composés de mélanges de caoutchouc, d'acier galvanisé et de textiles dont le caoutchouc représente environ 48% de son poids [33].

Du fait de leur nature de non-décomposition, les déchets de pneumatiques se caractérisent par les impacts négatifs qui peuvent affecter la santé publique et l'environnement lorsqu'ils sont traités en décharge ou éliminés de manière inappropriée sans traitement. Cependant, l'avantage du pneu usé est qu'il conserve encore de nombreuses qualités, ce qui en fait une véritable matière première, tel que : élasticité, solidité de la structure, pouvoir calorifique, teneur élevée en carbone, durabilité, amortissement [34].

Ces propriétés peuvent permettre leur réutilisation dans l'ingénierie civile et géotechnique (technique pneu sol), et utilisation dans des applications telles que l'asphalte routier [35].



Figure 1.5. Cas d'une décharge des pneus usés (stockage à l'air libre).

Le processus de traitement et de transformation des pneus usagés permet une nouvelle utilisation sous une autre forme. Les granulats de caoutchouc utilisés dans le domaine de génie civil sont obtenus par broyage des pneus usagés non réutilisables et sont classés en plusieurs catégories :

- pneus coupés : morceaux de taille supérieure à 300 mm,
- déchiquetas : pneus découpés en morceaux irréguliers de 15 à 300 mm,
- granulats : pneus réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 15 mm,
- poudrette : particules de granulométrie inférieure à 1 mm [33].

1.4.2.2 Caoutchouc de pneu dans le béton

L'utilisation de caoutchouc de pneu dans la technologie de la construction a été largement reconnue dans l'ingénierie des routes et des chaussées. Cependant, l'utilisation de ce sous-produit en tant que composant de mélange mortier / béton a été poursuivie depuis le début des années 90 [36, 37]. À ce jour, de nombreux succès ont été rapportés par des chercheurs du monde entier, où ils arrivent à certains avantages (faible poids (béton léger), haute résistance à l'abrasion, haute ductilité, amélioration de la fragilité, haute résilience, durabilité et élasticité, absorption des chocs et des vibrations, amélioration du rétrécissement et de la fissuration, bonne résistance à la pénétration d'ion de chlorure).

Ils ont également trouvé des inconvénients tel que la réduction des résistances mécaniques (compression, traction et flexion) [38].

L'utilisation de caoutchouc des pneus dans le béton se trouve sous différentes formes. Plusieurs recherches ont étudié l'effet du remplacement des gros granulat (gravier) par les granulats de caoutchouc sous forme de copeaux sur les propriétés des béton [39- 42], le remplacement des granulats fins dans le mortier [43- 46] , dans le béton [47-56] et dans le béton autoplaçant [57- 59] et aussi la combinaison des gros et fins granulats de caoutchoucs [60- 68]. Le taux de remplacement varie de 2.5% à 100% en poids ou en volume. Le remplacement de ciment par la poudrette de caoutchouc est aussi étudié dans divers études dans la pâte de ciment [69-71] est aussi le béton [72, 73], dont le taux de substitution du ciment varie de 5% à 50% en poids ou en volume.

1.4.2.3 Effets de granulats de caoutchouc(GC) sur les propriétés des bétons à l'état frais

1.4.2.3.1 Ouvrabilité

De nombreux auteurs ont étudié l'ouvrabilité du béton et du mortier incorporant les granulats de caoutchouc [42, 54, 63, 65, 74-76]. Ils ont observé une diminution de cette propriété avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc due à l'augmentation de la viscosité du mélange.

Zheng et al. [42] montrent que l'affaissement moyen est passé de 140 mm du mélange sans caoutchouc à 130, 100 et 80 mm avec le remplacement de granulats de caoutchouc de 15%, 30% et 45%. Autres études ont indiqué une conclusion un peu différente. Selon Balaha et al. [47], l'ajout de caoutchouc augmente l'affaissement du béton caoutchouté. Une autre étude réalisée sur le mortier a montré que l'étalement et l'affaissement des mortiers augmentent avec l'augmentation du pourcentage des GC [77].

Eldin et Senouci [36, 37], Khaloo et al. [64] concluent que le béton caoutchouté présente une ouvrabilité acceptable en termes de facilité d'écoulement, de placement et de finition.

Pour le béton autoplaçant, dans les paramètres d'état frais restant dans le domaine de BAP requis par les recommandations de l'AFGC, la substitution de 2,5%, 5% ,10% et 20% des granulats naturels par des granulats de caoutchouc contribue à une légère variation de la maniabilité [78]. Bignozzi et Sandrolini [57] ont rapporté que les mélanges de béton autoplaçants contenant des déchets de pneus ont une bonne capacité à s'écouler et à passer en présence d'obstacles. Il nécessite une quantité de superplastifiant légèrement supérieure à celle du BAP pour atteindre des propriétés d'auto-compaction, en gardant des rapport E/C et eau / poudre constants.

1.4.2.3.2 Teneur en air

La teneur en air est un paramètre important dans les bétons et mortiers, l'augmentation de l'air occlus entraînerait une diminution de la résistance à la compression après une période de durcissement désignée.

La substitution de granulats naturels par des granulats de caoutchouc, entraîne une augmentation de la teneur en air, par rapport au béton témoin [44, 62, 65, 69, 70, 72]. Cette augmentation peut être due à la nature non polaire des particules de caoutchouc et à leur capacité à emprisonner l'air dans leur texture de surface dentelée [72].

Par contre, Al Akhrass et al. [43] concluent que la teneur en air a diminué avec l'augmentation du taux de substitution de caoutchouc (caoutchouc sous forme de cendre volante) de 2.6% à

1.5% pour un mortier contenant 10% de caoutchouc. Cette diminution peut être due au remplissage des vides d'air présents dans le mélange de mortier par les particules de caoutchouc ce qui est dû à une grande durée de vibration pour obtenir un compactage satisfaisant et adéquat du mortier caoutchouté [43].

1.4.2.3.3 Densité

La densité d'un béton dépend de sa composition en particulier de la densité des granulats utilisés. Il existe un accord général sur le fait que l'incorporation des particules de caoutchouc dans le béton, la pâte de ciment et le mortier diminue leurs densités [42, 47, 54, 63, 64, 69, 70, 72, 75, 78, 79- 81]. En raison de la faible densité du caoutchouc, celle du béton diminue à mesure que le pourcentage de caoutchouc augmente. De plus, l'augmentation de la teneur en caoutchouc augmente la teneur en air, ce qui la réduit encore [72, 78]. Une observation similaire sur la densité du béton de caoutchouc a été rapportée par Siddique et Naik [82]. Ils ont suggéré que la nature non polaire des particules de caoutchouc pourrait résulter en la capacité de repousser l'eau et de piéger l'air sur la surface en caoutchouc, ce qui augmenterait par la suite le nombre de vides d'air et diminuerait ainsi la densité du béton. Selon Fedroff et al. [72], la diminution est presque négligeable pour l'augmentation de la teneur en caoutchouc de 20 à 30%. Une observation similaire a été rapportée par Su et al. [54]. Comme la teneur en caoutchouc était limitée à 20% dans cette étude, une nette diminution de la densité fraîche de béton a été observée, indépendamment de la taille des particules de caoutchouc utilisées.

Bravo et De Brito [81] ont indiqué que lorsque la taille de granulats de caoutchouc diminue, la différence de densité à l'état frais du béton caoutchouté par rapport au béton de référence devient plus grande.

Avec l'incorporation de G.C on peut envisager la production de bétons légers de structure. Le allégé confirme aussi la possibilité d'utiliser du béton caoutchouté pour des applications architecturales telles que les fausses façades et la construction intérieure [80, 82].

1.4.2.4 Effets des granulats de caoutchouc(GC) sur les propriétés des bétons à l'état durci

1.4.2.4.1 Résistance à la compression

Le type des granulats est parmi les paramètres qui ont une influence sur la résistance à la compression.

Les chercheurs qui ont travaillé sur les matériaux cimentaires, dont une partie des granulats naturels ou du ciment est remplacée par des G.C, ont tous relevé que cette substitution entraînait inévitablement une chute de la résistance en compression [36, 37, 41, 54, 61, 63-65, 67, 69, 72, 80]. Cette détérioration est d'autant plus importante que le taux de substitution est élevé. Eldin et Senouci [36, 37] ont montré des réductions allant jusqu'à 85% de la résistance à la compression. Elles ont été observées lorsque le granulat grossier a été remplacé par du caoutchouc. Une observation similaire obtenue par Toutanji et al. [41], où ils concluent que la le remplacement de 100% de granulats naturels entraînait une perte de résistance à la compression atteignant jusqu'à 75%. Khatib et Bayomy [65] ont confirmé aussi qu'il y a une chute de 90 % de cette propriété pour 100% de remplacement par du caoutchouc. Ces auteurs ont recommandé que la teneur en caoutchouc ne doive pas dépasser 20% du volume total agrégé dans le mélange pour éviter une grande réduction de la résistance.

Les travaux rapportés par Aiello et Leuzzi [80] indiquent que la substitution par des gros granulats de caoutchouc réduisait la résistance à la compression plus que la substitution avec des granulats fins.

Cette réduction de la résistance trouve son origine dans les causes suivantes :

1. Le caoutchouc est beaucoup plus mou que la pâte de ciment environnante (élastiquement déformables), lors du chargement, les fissures sont initiées rapidement autour des particules de caoutchouc et ces derniers se détachent de la pâte de ciment, ce qui accélère la rupture de la matrice caoutchouc.
2. La liaison entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment est faible, de sorte que ces particules molles peuvent être vues comme des vides dans le béton. L'augmentation supposée de la teneur en vides entraînerait certainement une réduction de la résistance.
3. La résistance du béton dépend fortement de la densité, de la taille et de la dureté des granulats. En remplaçant une certaine quantité des granulats naturels par des particules de caoutchouc de faible densité, on aura une réduction de la résistance [65].

La figure 1.6 met en contraste la mauvaise liaison de la pâte de ciment avec le caoutchouc et sa liaison étroite avec le sable naturel. C'est un facteur supplémentaire contribuant à la diminution de la résistance à la compression du matériau composite [46].

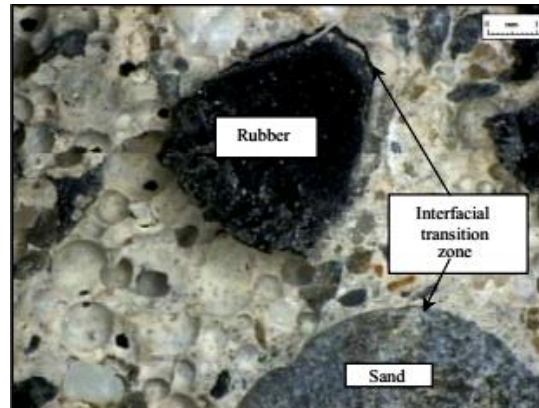


Figure 1.6. Zone de transition interfaciale entre «pâte de ciment et granulat de caoutchouc» et entre «pâte de ciment et granulat de sable naturel» ». [46]

1.4.2.4.2 Résistance à la traction

Le béton a une faible résistance à la traction. Cette propriété reste importante puisqu'elle permet d'estimer la charge sous laquelle se développe la fissuration. Comme il est évoqué à propos de la résistance à la compression, l'unanimité des chercheurs admet dans la littérature que les granulats de caoutchouc sont préjudiciables à la résistance à la traction [36, 37, 46, 54, 63, 73].

Des réductions allant jusqu'à 50% de la résistance à la traction ont été observées lorsque les gros granulats ont été 100% remplacés par des particules de caoutchouc. Cette perte est moins prononcées que celle à la compression [36, 37].

Selon Su et al. [54], lorsque 20% du sable fin a été remplacé par du caoutchouc, il y a eu une diminution de la résistance à la traction d'environ 11%. Ces auteurs concluent que plus la taille des particules de caoutchouc est petite, plus la perte de résistance est faible. Cette raison est similaire à celle de la résistance à la compression, car les plus petites particules de caoutchouc peuvent avoir un effet de remplissage pour augmenter la compacité du béton et réduire le niveau de singularité des contraintes sur les vides internes, et par conséquent réduire la probabilité de fracture [54].

1.4.2.4.3 Résistance à la flexion

Une perte de résistance à la flexion est associée au remplacement des granulats naturels dans un béton ou un mortier par des granulats de caoutchouc [41, 54, 65, 72, 73, 80]. Comme la résistance à la compression, cette diminution est toujours liée à la faible adhérence entre les

particules de caoutchouc et la pâte de ciment [73]. Une réduction significativement plus faible de la résistance à la flexion (35%) par rapport à la résistance à la compression (75%) pour 100% de substitution des granulats de caoutchouc [41].

Selon Aiello et Leuzzi [80], la réduction de la résistance à la flexion est plus importante lors du remplacement des gros granulats plutôt que les granulats fins par des particules de caoutchouc. Ces réductions sont 28% et 7.3% respectivement.

Des observations visuelles pendant les essais de flexion ont montré qu'à la charge ultime, il est observé un comportement de rupture ductile du mortier caoutchouté [35].

1.4.2.4.4 Module d'élasticité statique et dynamique

De nombreux travaux confirment que l'incorporation de G.C. induit une chute importante du module d'élasticité statique [40, 50, 52, 63, 73, 76]. Cela est par ailleurs prévisible compte tenu des relations empiriques existantes permettant d'estimer le module d'élasticité à partir de la résistance en compression.

Li et al. [40, 50] ont montré que le module d'élasticité statique diminuait de 42% pour un remplacement de caoutchouc de 10%. Ce module diminue avec la réduction de la taille des particules de caoutchouc et de l'augmentation de la teneur de ces derniers [63].

Le module d'élasticité dynamique est déterminé en utilisant un test non destructif sans une contrainte appliquée et donc il n'y a ni formation de micro fissure ni fluage pendant l'essai. En conséquence, il apparaît plus élevé que le module d'élasticité statique [66]. Ce module est réduit à mesure que le pourcentage de particules de caoutchouc augmente [36, 37, 42, 44, 45, 66]. Benazzouk et al. [44] montrent que l'ajout de particules de caoutchouc dans la matrice cimentaire, réduit le module d'élasticité dynamique de 86% pour une teneur en caoutchouc de 100%. Cette diminution peut être principalement due à une absorption significative des vibrations acoustiques par les particules de caoutchouc comparées aux granulats minéraux, ainsi qu'à l'augmentation de la porosité due à l'entraînement de l'air [44, 66].

Selon Eldin et Senouci [36, 37], le remplacement par du caoutchouc des gros granulats entraîne une réduction du module d'élasticité dynamique plus importante que le remplacement des granulats fins.

1.5 Durabilité du béton

La durabilité est l'une des propriétés importantes du béton car il a la capacité de durer dans le temps sans subir de dégradations, tous en conservent son intégrité et en maintenant sont niveau de fiabilité. La durabilité est liée à la résistance aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (milieu humide, milieu marin, effet du gel-dégel, pollution atmosphérique, etc.) et aux sollicitations mécaniques de l'ouvrage [6]. Elle dépend de nombreux paramètres dont la qualité de conception, la qualité des matériaux et l'environnement.

1.5.1 Agents de transfert des agents agressifs

La durabilité du béton est en grande partie fonction de la difficulté qu'ont les agents agressifs à pénétrer dans le réseau poreux du béton. Deux grandeurs physiques permettent de caractériser l'aptitude des bétons à résister à l'intrusion des agents agressifs : la perméabilité et la diffusion.

- **La perméabilité** d'un matériau est définie comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. Il s'agit donc d'une propriété macroscopique des matériaux poreux ayant une porosité ouverte interconnectée.

Les bétons durables sont, en général, des bétons de faible perméabilité dans la mesure où la faible perméabilité limite la pénétration des agents agressifs au sein du béton. Cette condition n'est pas toujours suffisante, car les phases solides du béton peuvent être plus ou moins réactives vis-à-vis des agents agressifs.

- **La diffusion** désigne le processus de transport d'un constituant dans un milieu donné sous l'effet de son agitation aléatoire à l'échelle moléculaire. S'il existe une différence de concentration entre deux points du milieu, ce phénomène engendre un transport global du constituant considéré, orienté de la zone la plus concentrée vers la zone la moins concentrée jusqu'à ce qu'il y ait équilibre des concentrations. Les transports par diffusion peuvent intervenir sous deux formes : en phase liquide (par exemple lors de l'attaque du béton par les sulfates de l'eau de mer ou par l'acide carbonique d'un sol riche en matières organiques) ou en phase gazeuse (la dessiccation d'un béton déjà partiellement séché (transport de vapeur d'eau), ainsi que la pénétration de gaz agressifs pour le béton ou pour ses armatures tels que le gaz carbonique ou l'oxygène) [83].

1.5.2 Dégradations des bétons

Les causes de dégradation des bétons sont nombreuses, et ont pour conséquence d'altérer les propriétés mécaniques du béton. Elles peuvent être principalement d'origines chimiques (réactions alcali-granulats, carbonatation, attaques par des acides, des sulfates, des chlorures, etc.), mécaniques (fissurations dues au chargement, gel-dégel de l'eau libre, etc.), ou thermiques que l'on peut observer dans un cas d'incendie, est particulier du fait que l'endommagement sera d'origine mécanique, ou chimique en fonction de l'élévation de la température. [3]

Au niveau de la structure du béton, ces endommagements se traduisent dans un premier temps par le développement de microfissures accompagnées d'une chute des caractéristiques mécaniques. Celles-ci viennent s'ajouter à celles initialement induites par le mécanisme de prise. A mesure que le temps avance pour un niveau de sollicitation plus élevé, les microfissures se propagent et, en se connectant avec des pores présents dans le béton, forment des macros fissures qui augmentent l'interconnexion de la porosité globale.

A terme, elles conduisent à une perte immédiate de ses caractéristiques mécaniques ainsi qu'une augmentation importante de la perméabilité favorisant la pénétration des agents agressifs au sein du béton. [3]

Les deux types de sollicitations chimiques (l'attaque sulfatique et la pénétration des chlorures), faisant partie de notre étude, sont détaillés ci-dessous ainsi que leurs conséquences respectives sur le béton.

1.5.2.1 Les attaques sulfatiques

Les sulfates représentent un risque majeur d'agression chimique pour le béton. L'attaque sulfatique est associée à la précipitation de produits sulfatés secondaires, d'une expansion importante et de la détérioration chimio-mécanique, qui peut conduire à la ruine du matériau cimentaire [13].

On distingue l'attaque sulfatique interne qui est une pathologie qui affecte certains bétons hydrauliques, elle résulte de la formation de cristaux d'ettringite pouvant être expansifs.

Cette pathologie est influencée par les conditions thermiques au jeune âge, les conditions environnementales et la composition du béton [84].

D'autre part, il y'a l'attaque sulfatique externe qui se produit lorsqu'un matériau cimentaire se trouve en contact direct avec une source de sulfate. Les sulfates qui sont à l'origine de la destruction des ouvrages en béton peuvent être présents naturellement dans les sous-sols,

intégrés dans la préparation du béton ou provenir de l'industrie (chimiques et pétrochimiques) suite à une pollution. Les sulfates se trouvent également associés aux alcalins dans les sels (sulfates de sodium, potassium, calcium et magnésium). On les trouve aussi dans les eaux de ruissellement ayant traversé des zones sulfatées (eau séléniteuses, eau d'infiltration, pluies d'acides,...).

Cette pathologie peut être décrite selon trois processus :

- Le transfert dans le milieu poreux des ions sulfates ;
- Les réactions chimiques entre les composants de la pâte de ciment,
- Le phénomène d'expansion, résultant de la cristallisation de nouveaux hydrates [13].

L'attaque du béton par les sulfates résulte d'une réaction chimique qui se produit en présence d'eau entre l'ion sulfate et l'aluminate de calcium hydraté, et/ou les éléments constitutifs de l'hydrate de calcium de la pâte de ciment durcie. Les produits qui résultent de ces réactions sont l'hydrate de sulfoaluminate de calcium communément appelé ettringite et l'hydrate de sulfate de calcium mieux connu sous le nom de gypse. Les volumes de ces solides sont beaucoup plus grands que ceux des corps qui leur ont donné naissance ; il en résulte des contraintes qui peuvent détériorer la pâte et finalement désintégrer le béton [85].

les conséquences macroscopiques de cette attaque sont d'ordre mécanique : chute de résistance et de rigidité, fissuration et déformation du matériau et d'ordre physico-chimique : modification de la porosité et des propriétés de transport et formation d'un hydrate expansif.

1.5.2.2 La pénétration des ions chlorure dans le béton

Le milieu maritime est un milieu très fortement agressif pour les structures en béton. Le béton est très sensible à l'agressivité physico-chimique de l'eau de mer. Cette action physico-chimique est plus ou moins prononcée selon l'exposition de la structure à l'environnement marin.

Pour les bétons en environnement marin, les espèces ioniques principales qui peuvent interagir avec le béton armé ou non armé sont les suivantes : les chlorures, les sulfates et dans une moindre mesure le magnésium [86].

La pénétration des ions chlorure dans le béton requiert la présence d'une phase liquide. En milieu saturé, dans le cas de structures immergées dans de l'eau de mer, les ions chlorure pénètrent dans le béton par diffusion, sous gradient de concentration (entre la surface contenant des chlorures et le cœur qui en est exempt). Lorsque la structure en béton est soumise à des cycles d'humidification/séchage (zone de marnage, exposition aux embruns ou

aux sels de déverglaçage), les chlorures peuvent pénétrer dans le béton par absorption capillaire et migrer avec la phase liquide par convection au sein de la zone concernée par les cycles [83].

Le taux de pénétration des chlorures dans le béton dépend de la structure poreuse du béton, qui est affectée par des facteurs y compris les matériaux, les pratiques de construction et l'âge [87]. Plus le béton est « compact » plus il est capable de s'opposer à la pénétration des chlorures [86].

1.6 Conclusion

Le béton est un matériau hétérogène, ses propriétés, qui évoluent dans le temps en fonction de son environnement et des différents types de sollicitations auxquelles il est soumis, dépendent de sa formulation, des conditions de sa mise en œuvre et des conditions de son exploitation.

On plus du béton classique, il existe en réalité une très large gamme de bétons. Le béton autoplaçant - dont utilisation intensive (au cours des dernières années) - a été motivée par sa bonne ouvrabilité, ces bonnes caractéristiques mécaniques et la bonne durabilité obtenue. L'utilisation des granulats de recyclage de déchet dans le béton, comme les granulats de caoutchouc, est une solution d'avenir afin de protégé les ressources naturels et de protéger l'environnement.

La durabilité est l'une des principales propriétés du matériau béton, elle est liée à la résistance aux agressions physico-chimiques du milieu environnant et aux sollicitations mécaniques de l'ouvrage. Parmi les principales causes de dégradation des bétons, l'attaque sulfatique et la pénétration des ions chlorures conduisent à une détérioration des propriétés initiales du matériau, qui à terme, peuvent conduire à la rupture.

La connaissance et le suivi des différentes propriétés des bétons sont d'un intérêt primordial pour la maintenance des ouvrages en béton. Pour cela des évaluations non destructives sont mises au point pour l'auscultation du béton. Elles permettent d'évaluer et détecter en temps réel des défauts évolutifs et aussi de déterminer les propriétés physiques de l'ouvrage sans l'endommager, d'où l'intérêt de ces techniques.

CHAPITRE 2

LES METHODES ULTRASONIQUES DANS L'EVALUATION NON DESTRUCTIVE

2.1 Introduction

La connaissance et le suivi des différentes propriétés des bétons sont primordiaux pour la maintenance des ouvrages de génie civil. Les techniques d'Evaluation Non Destructif (END), sont mises au point pour l'auscultation du béton pour évaluer et détecter en temps réel soit des défauts évolutifs soit pour l'évaluation des propriétés mécaniques de l'ouvrage sans l'endommager, d'où l'intérêt de ces techniques. Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement à la méthode non destructive par les ultrasons. On expose les principes de propagation des ondes ultrasonores sur les quelles sont fondées les méthodes non destructives, ainsi que la potentialité de ces méthodes pour l'évaluation des bétons.

2.2 Importance et nécessité des essais non destructifs

Idéalement, il est nécessaire de tester les structures en béton après le durcissement du béton pour déterminer la pertinence de la structure pour son utilisation prévue, avec des essais qui devraient être effectués sans endommager le béton. Les essais disponibles pour tester le béton vont des essais totalement non destructifs, où il n'y a aucun dommage au béton, aux tests partiellement destructifs, tels que les tests d'arrachement, où la surface doit être réparée après le test. Les tests non destructifs peuvent être appliqués aussi bien aux anciennes structures qu'aux nouvelles. Pour les nouvelles structures, les principales applications seront probablement le contrôle de la qualité des matériaux ou de la construction. Bien que les tests des structures existantes soient généralement liés à l'évaluation de l'intégrité ou de l'adéquation structurelle. Dans les deux cas, si des tests destructifs seuls sont utilisés, par exemple en retirant des carottes pour les tests de compression, le coût du carottage et des tests peut ne permettre qu'un nombre relativement limité de tests sur une grande structure, ce qui peut être non représentatif. Dans ce cas les essais non destructifs peuvent être utilisés comme préliminaire au carottage ultérieur [88, 89].

Les méthodes des essais non destructives sont de plus en plus appliquées pour l'étude des structures en béton. L'augmentation de leur application est due à un certain nombre de facteurs :

- Améliorations technologiques du matériel et des logiciels pour la collecte et l'analyse des données ;
- Les avantages économiques de l'évaluation de gros volumes de béton par rapport au carottage ;
- Capacité à effectuer des évaluations rapides et complètes des constructions existantes [90].

L'utilisation des méthodes d'END va du simple au compliqué, ou l'inspection visuelle est la plus simple de toutes. Les imperfections de surface invisibles à l'œil peuvent être révélées par des méthodes pénétrantes ou magnétiques. Si l'on découvre des défauts de surface vraiment graves, il est souvent peu utile de procéder aux essais plus compliqués.

L'une de ces méthodes est la méthode des vitesses d'impulsions ultrasonores qui sera étudiée dans ce travail [89].

2.3 Méthode des vitesses d'impulsions ultrasoniques

Une onde ultrasonique traversant le béton interagira avec n'importe quel obstacle sur son chemin. Les changements mesurés des caractéristiques de propagation des ondes peuvent être attribuées aux propriétés des matériaux ou des caractéristiques structurelles du béton. Ces relations fondamentales ont conduit à l'utilisation des ultrasons pour les essais non destructifs (END) en génie civil depuis des décennies [91].

De nombreuses méthodes d'essais ont été proposées pour les éprouvettes de laboratoire utilisant des méthodes vibratoires à partir des années 1930. Depuis les années 1960, les méthodes de vitesse d'impulsion ont quitté les laboratoires pour se diriger vers les chantiers pour tester les ouvrages in situ [92]. La technique est connue sous le nom de transmission par ultrasons ou, plus communément, la méthode de vitesse d'impulsion ultrasonique. Cette méthode est basée sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion d'ondes ultrasonores de compression sur une longueur de trajet connue [90]. Ce temps de parcours peut alors être utilisé pour obtenir la vitesse acoustique d'un matériau donné. C'est une méthode vraiment non destructive, puisque la technique utilise des ondes mécaniques qui n'endommagent pas l'élément testé. Une éprouvette d'essai peut être testée plusieurs fois dans le même endroit, ce qui est utile pour surveiller le béton subissant des changements structurels internes au fil du temps [92].

- **Avantages et limites**

La méthode de la vitesse d'impulsion est un excellent moyen d'étudier l'uniformité du béton. La procédure de test est simple et les équipements disponibles sont relativement peu coûteux et faciles à utiliser en laboratoire comme sur le terrain. Pour cela, les essais par ultrasons ajoutent une nouvelle dimension au contrôle de qualité du béton sur le terrain.

Les essais de vitesse des impulsions ultrasoniques fournissent un moyen efficace de délimiter les fissures dans les structures en béton [92].

2.4 L'onde ultrasonore

Les ultrasons sont des vibrations mécaniques prenant naissance et se propageant dans tout support matériel (solide, liquide ou gaz) présentant une certaine élasticité. En continuation de la gamme sonore, les ultrasons correspondent à des fréquences oscillatoires supérieures à la limite d'audibilité humaine et s'étendant dans une large gamme allant de 15 kHz à plus de 100 MHz (Figure 2.1).

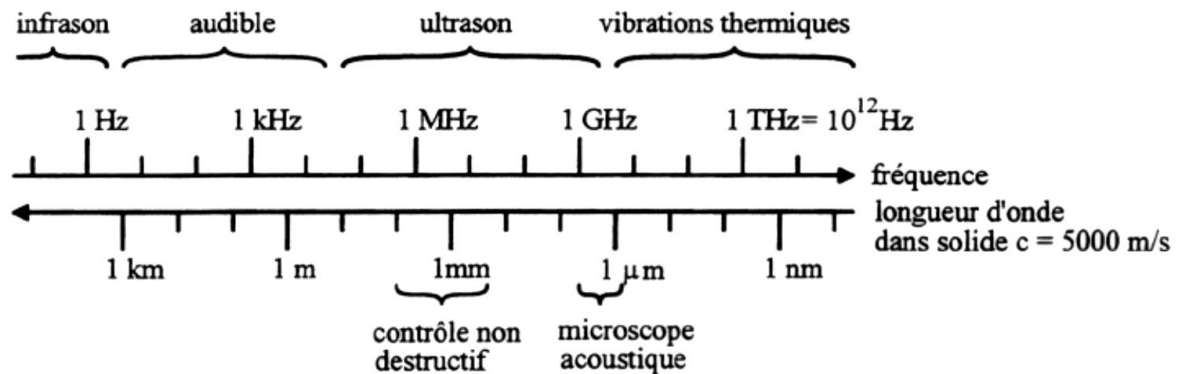


Figure 2.1. Échelle des ondes élastiques.

La gamme de 0.1 à 10 MHz couvre la grande majorité des applications des ultrasons en contrôle non destructif industriel. Pour les matériaux courants, les fréquences correspondent, à des longueurs d'onde ultrasonore de l'ordre du millimètre, valeur réalisant un bon compromis entre directivité, absorption, détectabilité des petits défauts, facilité de réalisation d'appareillages électroniques et de transducteurs fiables et économiques [93].

2.5 Phénomènes de propagation des ondes mécaniques

La propagation des ondes est un phénomène physique qui traduit la progression d'une onde ainsi que son évolution dans un matériau.

Selon la nature du milieu, une onde est entièrement décrite par une grandeur scalaire comme la pression ou par une grandeur vectorielle comme le déplacement particulaire. La direction de déplacement des particules est appelée polarisation [93].

On a trois types d'ondes qui peuvent se propager dans un matériau sont :

- **Les ondes longitudinales** ou encore ondes P (Primaires) sont des ondes de compression. Le mouvement du matériau engendré par le passage de l'onde se fait

parallèlement à la direction de propagation de celle-ci. Ce sont les ondes qui ont la vitesse de propagation la plus élevée ;

- **Les ondes transversales** ou encore ondes S (Secondaires) sont des ondes de cisaillement. Le mouvement du matériau engendré par le passage de l'onde est perpendiculaire à la direction de propagation de celle-ci. Leur vitesse de propagation est généralement de l'ordre de 50% à 75% de celle des ondes de compression ;

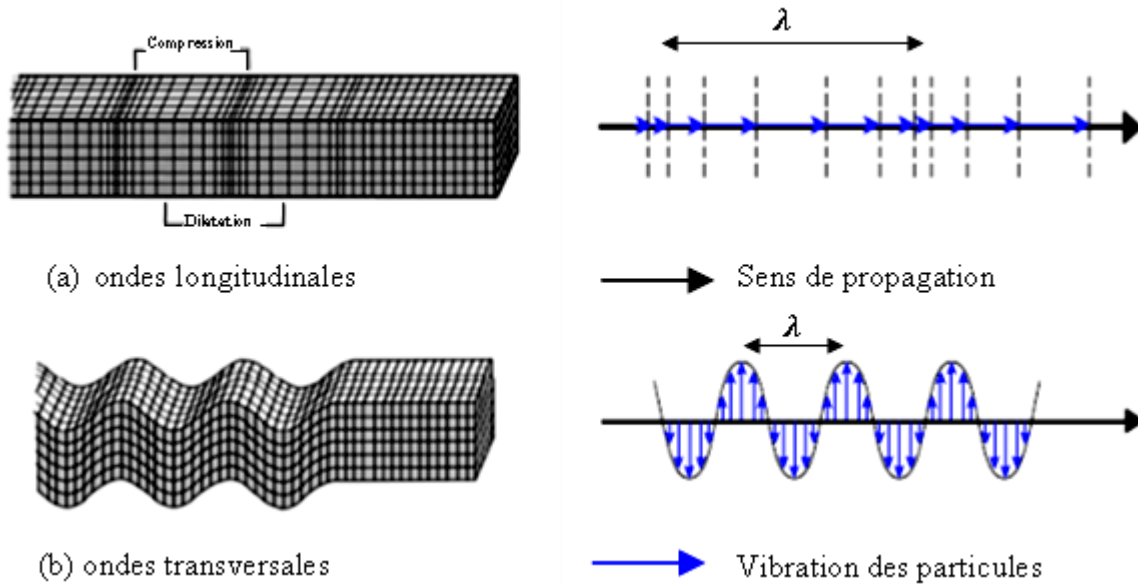


Figure 2.2. Propagation et polarisation des ondes de volume.

- **Les ondes de surface** ou ondes R sont une combinaison des deux types d'ondes précédentes. Les plus connues sont les ondes de Rayleigh d'où le nom d'onde R. D'autres modes de propagation d'ondes de surface sont possibles comme les ondes rampantes de Love, les ondes de Bleustein – Gulyaev ou encore les ondes de Lamb dans les tôles (Figure 2.3).

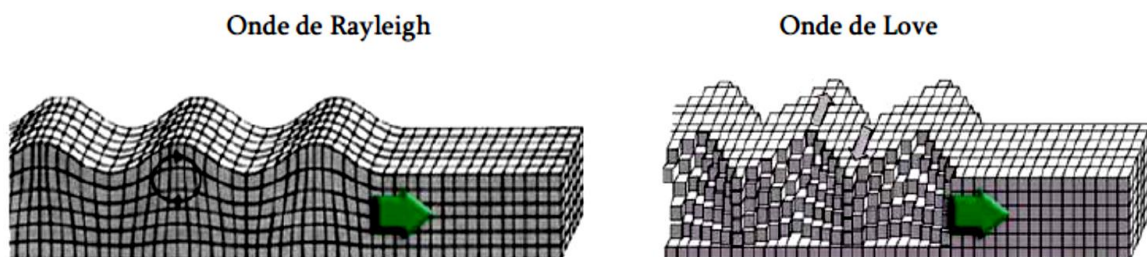


Figure 2.3. Propagation et polarisation des ondes de surface.

Chaque onde a une longueur d'onde λ donnée, qui est associée à sa fréquence f et à sa vitesse V par la relation suivante : [94]

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (2.1)$$

2.6 Faisceau ultrasonique

Le phénomène de diffraction d'un faisceau d'ultrasons est également important à prendre en compte. En effet, les dimensions finies de la source utilisée pour générer les ultrasons implique un phénomène de diffraction (ou divergence) du champ ultrasonore émis. Dans le cas d'une source circulaire de diamètre D (cas des transducteurs utilisés dans notre étude), l'ouverture du faisceau peut être calculée par le biais de la formule :

$$\sin \theta = \frac{1.22\lambda}{D} \quad (2.2)$$

Avec D diamètre du transducteur et λ la longueur d'onde.

Le faisceau sera donc plus ou moins ouvert selon la taille de la source, la fréquence de travail et le milieu de propagation (Figure 2.4). On distingue alors deux zones de propagation :

Le champ proche, où le faisceau est droit et approximativement cylindrique. C'est la zone de Fresnel, généralement sa longueur est symbolisée par L_0 avec :

$$L_0 = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (2.3)$$

Cette zone est la partie utile du faisceau ultrasonore.

Ensuite le faisceau diverge et semble provenir du centre de l'émetteur en faisant un angle θ avec l'axe, et l'amplitude décroît de façon monotone.

Le champ lointain, où le faisceau est ouvert mais où l'amplitude décroît de façon monotone. La limite entre ces deux zones, appelée limite de champ proche, se situe à la distance $D^2/4\lambda$ de la source. C'est une caractéristique très importante en contrôle non destructif [95, 96].

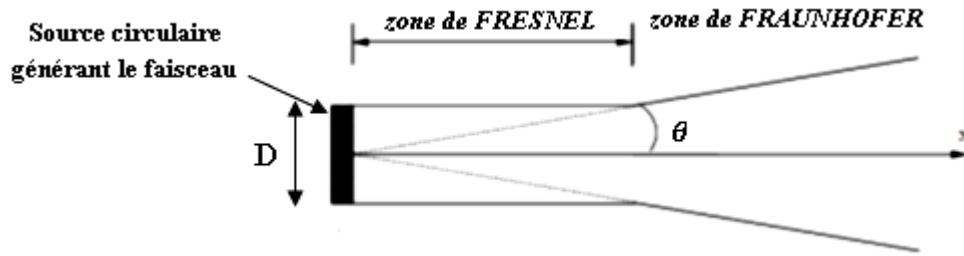


Figure 2.4. Champs proche et lointain.

2.7 Grandeurs caractéristiques de la propagation d'ondes ultrasoniques

La propagation des ondes ultrasoniques dans un milieu est caractérisée par un certain nombre de grandeurs.

2.7.1 Vitesse

De nombreux pays ont développé des procédures normalisées pour mesurer la vitesse d'impulsion, plusieurs normes sont comparées par Komlos et al. [97]. À la fin des années 1960, une norme de vitesse d'impulsion a été développée par le comité ASTM. Une norme provisoire a été publiée en 1968. Une méthode d'essai standard a été publiée en 1971 et aucune modification significative n'a été apportée à la norme depuis lors.

Donc La vitesse acoustique d'un solide varie en fonction de sa composition [92]. Chaque type d'onde se propage avec sa vitesse caractéristique. Pour un solide donné, les ondes de compression ont la vitesse la plus élevée tandis que les ondes de surface ont la plus faible vitesse.

Dans le béton, les vitesses des ondes de cisaillement et de surface sont généralement respectivement de 60 et 55% de la vitesse de l'onde de compression. La vitesse particulière d'une onde dépend des propriétés élastiques et de la densité du milieu [92].

Avec ρ la densité, E le module d'élasticité (dynamique) et ν le coefficient de Poisson du solide, la vitesse de propagation de l'onde de compression, V_p , dans le solide élastique est donnée par la formule :

$$V_p = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (2.4)$$

L'onde transversale (de cisaillement) se propage à une vitesse plus lente, V_s , donnée par :

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho 2(1+\nu)}} \quad (2.5)$$

Où G est le module d'élasticité de cisaillement.

L'amplitude de l'onde de surface diminue rapidement avec la distance de la frontière, la majorité d'énergie étant contenue dans une couche d'une largeur d'une longueur d'onde. Sa vitesse de propagation est toujours un peu plus petite que la vitesse de l'onde de cisaillement.

Cette vitesse est à peu près :

$$V_R = \frac{0.87+1.12\nu}{1+\nu} V_s \quad (2.6)$$

Ce modèle d'onde élastique est valable pour toutes les fréquences [91].

Un paramètre utile est le rapport entre la vitesse de l'onde S et la vitesse de l'onde P qui dépend du coefficient de Poisson, comme suit :

$$\frac{V_s}{V_p} = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \quad (2.7)$$

Dans le volume d'un solide ou près de sa surface, les trois types d'ondes se propagent tous indépendamment les uns des autres avec leur vitesse de propagation respective. Cela signifie qu'ils peuvent traverser sans interagir. Lorsqu'une onde atteint la limite d'un obstacle sur ou dans le solide, une partie de l'énergie de l'onde sera transmise dans le matériau derrière la frontière, et la partie restante sera réfléchiée. En fonction du rapport de la longueur d'onde à la taille de l'obstacle, les effets résultants sont résumés sous les termes réflexion pour les petites longueurs d'onde et diffusion pour les petits obstacles. La diffraction décrit la déviation d'une onde par rapport à sa direction de propagation causée par des obstacles [91].

2.7.2 Atténuation

Le signal ultrasonique qui se propage dans un milieu s'atténue au cours de son trajet. Cette atténuation est due à des interactions entre l'onde et le milieu de propagation qui provoque une diminution de l'amplitude de l'onde et une perte préférentielle de ses hautes fréquences [7]. Le facteur d'atténuation de l'onde α correspond à la décroissance de l'amplitude d'une onde en fonction de sa distance de parcours. Selon une loi exponentielle, elle est donné par :

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \quad (2.8)$$

A_0 correspond à l'amplitude initiale de l'onde et $A(x)$ à l'amplitude à une distance x [98].

L'atténuation peut être décrite plus précisément comme l'effet combiné d'un certain nombre de paramètres qui peut créer des perturbations et des signaux erratiques dans un matériau :

- **L'absorption** : c'est une dissipation thermique qui est due à la conversion de l'énergie mécanique en chaleur par des phénomènes de friction interne, ainsi qu'au temps de relaxation des molécules au sein du matériau. Ce type d'atténuation intrinsèque est lié à la viscosité du matériau contrôlé [2].

- **La diffusion** : elle est liée au matériau et correspond à l'interaction des ondes avec les hétérogénéités qui peuvent être des pores, des précipités, des inclusions, des joints de grains, ou encore des défauts. Ce mécanisme est variable en fonction de la taille, de la forme et de la répartition de ces hétérogénéités [8].

Le cas du béton avec des longueurs d'ondes utilisées de l'ordre de 100 mm à moins de 5 mm pour des fréquences de l'ordre de 20 kHz à de 1 MHz se situe dans le domaine pour lequel les phénomènes de diffusion sont importants [99].

- **L'étalement géométrique de l'onde** : dépend du diamètre et de la fréquence du transducteur. Il est possible de s'affranchir de ce phénomène en travaillant à une distance suffisante de la source de l'onde afin que celle-ci devienne plane.

Donc l'atténuation totale d'une onde est la somme de ces trois différents phénomènes [98].

$$\alpha_{TOT} = \alpha_{visqueux} + \alpha_{diffusion} + \alpha_{étalement\ géométrique} \quad (2.9)$$

2.8 Équipement et procédure d'essais de vitesse d'impulsion ultrasonique

Les principaux composants des dispositifs modernes de mesure de la vitesse des impulsions ultrasonores sont représentés schématiquement sur la figure 2.5.

L'équipement consiste essentiellement en un générateur d'impulsions électriques (un moyen de production et d'introduction d'une impulsion d'onde dans le béton) et une paire de transducteurs (émetteur et récepteur). La génération et la réception des ondes ultrasonores sont réalisées à l'aide de cristaux piézoélectriques. Les éléments piézoélectriques sont réciproques, ce qui signifie qu'une tension appliquée génère une déformation ou qu'une contrainte incidente génère une tension. Cette propriété physique rend les éléments piézoélectriques idéaux comme transducteurs [100].

Le générateur d'impulsions est utilisé pour appliquer une haute tension au transducteur émetteur (source), et la tension soudainement appliquée fait vibrer le transducteur à sa fréquence naturelle. La vibration de l'émetteur produit l'impulsion de contrainte qui se propage dans l'élément. En même temps que l'impulsion de tension est générée, une minuterie

électronique très précise est activée. Lorsque l'impulsion arrive au récepteur, la vibration est changée en un signal de tension qui éteint la minuterie, et un affichage du temps de trajet est présenté [90]. Les exigences pour un dispositif de vitesse d'impulsion approprié sont données dans ASTM C 597 [101]. L'équipement peut également être connecté à un oscilloscope, ou à un autre dispositif d'affichage, pour observer la nature de l'impulsion reçue et pour pouvoir mesurer l'atténuation du signal [101].

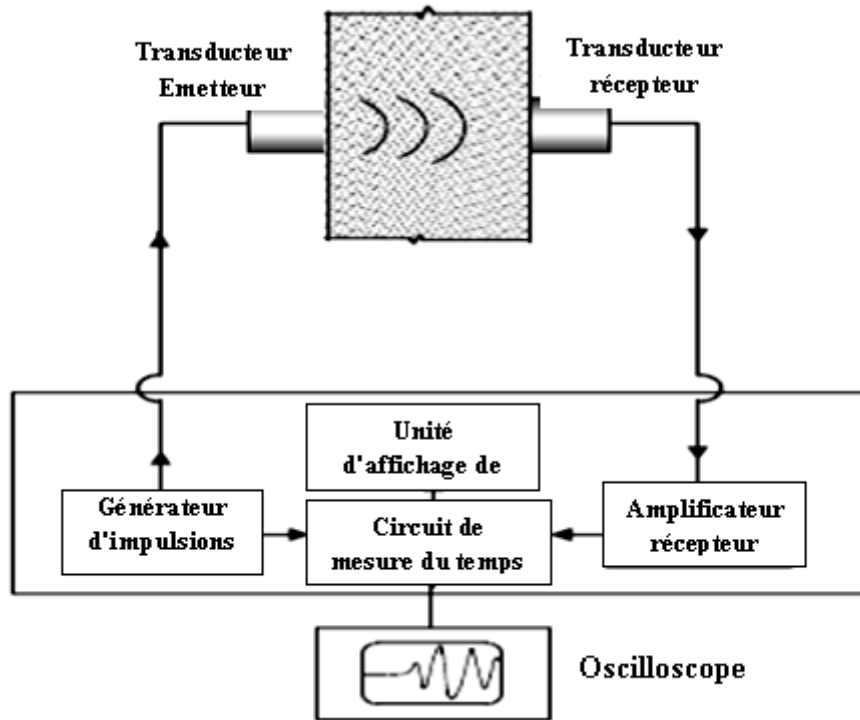


Figure 2.5. Diagramme schématique du circuit d'essai de vitesse d'impulsion.

Des transducteurs avec des fréquences de 25 à 100 kHz sont généralement utilisés pour tester le béton. Des ensembles de transducteurs ayant différentes fréquences de résonance sont disponibles pour des applications spéciales. En général les transducteurs à haute fréquence (au-dessus de 100 kHz) sont utilisés pour des échantillons de petite taille, des trajets relativement courts ou du béton à haute résistance. Tandis que les transducteurs à basse fréquence (inférieurs à 25 kHz) sont utilisés pour des échantillons plus gros et des longueurs de trajet relativement plus longues, ou pour le béton avec des granulats de plus grande taille [92]. Les transducteurs avec une fréquence de 50 kHz à 60 kHz conviennent à la plupart des applications courantes [88].

La norme ASTM C597 exige une barre de métal ou d'un autre matériau pour lequel le temps de transit des ondes de compression soit connu. Cette barre de référence est utilisée pour calibrer l'équipement à ultrasons avant chaque test [100].

Pour transmettre ou recevoir l'impulsion, les transducteurs doivent être en contact total avec l'objet à tester ; sinon, une poche d'air entre l'objet de test et le transducteur peut introduire une erreur dans le temps de transit indiqué.

Un agent de couplage est généralement nécessaire pour assurer le transfert efficace de l'énergie mécanique entre le transducteur et le matériau testé. Le but du placement du matériau de couplage entre le transducteur et l'éprouvette est d'éliminer l'air entre les surfaces respectives. En règle générale, les agents de couplage sont constitués de liquides visqueux tels que la graisse, la vaseline le savon doux et la pâte de kaolin, ou la couche de couplant doit être aussi fine que possible. L'eau est considérée comme un agent de couplage acceptable pour les tests ultrasoniques sous l'eau (la méthode d'essai par immersion).

On trouve aussi les méthodes d'essai par ultrasons sans contact qui sont en recherche continue [100].

- **Calcul de la vitesse d'impulsion**

La vitesse de l'onde de vitesse acoustique d'un spécimen de béton donné peut être facilement obtenue avec le temps de déplacement d'une onde et la longueur de l'éprouvette.

Des circuits électroniques de temporisation permettent de mesurer le temps de transit T nécessaire à l'impulsion de l'onde traverser le béton.

La vitesse d'impulsion longitudinale (en km/s ou m/s) est donnée par :

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.10)$$

Où V : la vitesse d'impulsion longitudinale ;

L : la longueur de trajet ;

T : le temps mis par l'impulsion pour parcourir cette longueur [88].

2.9 Types de configuration

Pour déterminer la vitesse d'impulsion ultrasonique, il existe trois configurations possibles dans lesquelles les transducteurs peuvent être agencés [92] :

2.9.1 Transmission directe

Le système de transmission directe devrait être utilisé dans la mesure du possible, car le transfert d'énergie entre les transducteurs est à son maximum et la précision de la détermination de la vitesse est donc régie principalement par la précision de la mesure de la longueur du trajet [88].

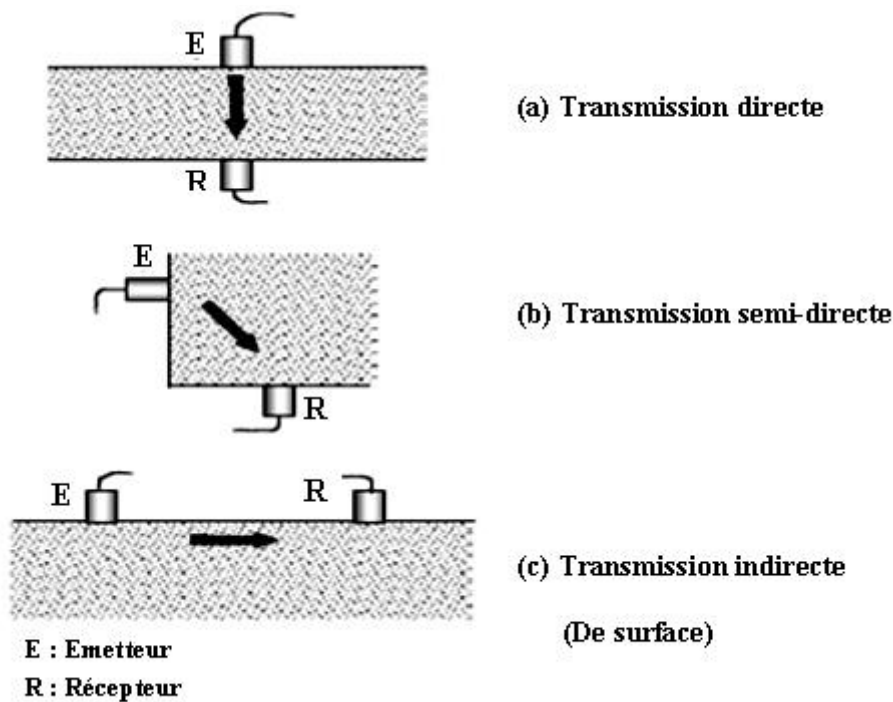


Figure 2.6. Configurations de mesure de vitesse d'impulsion.

2.9.2 Transmission semi-directe

La méthode de transmission semi-directe a une sensibilité intermédiaire entre celles des deux autres configurations et, bien qu'il puisse y avoir une certaine réduction de la précision de la mesure de la longueur du trajet, il s'avère généralement suffisamment précis pour prendre cela comme la distance mesurée du centre au centre des faces des transducteurs. Cette méthode est par ailleurs similaire à la transmission directe [88]. Cette méthode est également utile pour tester des colonnes qui contiennent des armatures dans le but d'éviter les interférences de l'acier intégré [92].

2.9.3 Transmission indirecte

La méthode de transmission indirecte ou la méthode de surface est la moins efficace des trois configurations de vitesse d'impulsion ultrasonore. Cela est dû à la nature des ondes qui traversent les surfaces des matériaux. Les amplitudes des ondes reçues via le transducteur de réception sont typiquement inférieures à 5% des ondes reçues par le procédé de transmission directe. Une si petite quantité d'énergie d'onde obtenue par le transducteur de réception peut entraîner des erreurs dans la mesure et l'analyse d'un signal d'onde. Bien que cette méthode est soit la moins efficace des deux autres, elle est utile dans les situations où une seule surface d'une structure ou d'un spécimen est accessible, comme une dalle de plancher. La vitesse des ondes de surface et la profondeur des fissures de surface sont également acquises par la méthode de surface [100].

2.10 Potentialité des méthodes ultrasonores pour l'évaluation des bétons

Les ondes ultrasonores ont été largement utilisées pour caractériser et évaluer le béton durci en fonction de la relation entre la vitesse des ondes ultrasoniques et les propriétés mécaniques des matériaux [102].

Cette méthode permet principalement de détecter la non-uniformité des propriétés des structures, des grosses fissures ou des vides résultants par exemple de "nids de cailloux". Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des matériaux des structures. [8]

Les caractéristiques concernant la résistance, la porosité et les dommages du béton peuvent être révélées de manière adéquate par l'analyse des signaux ultrasoniques [103]. Cependant, la vitesse mesurée dépendant également de beaucoup paramètres du béton comme les hétérogénéités, la teneur en eau, les conditions de cure, la température, la présence de microfissures...etc. [8]

2.10.1 Facteurs affectant la vitesse ultrasonique

De nombreux travaux ont porté sur l'étude de la variation des grandeurs caractéristiques de propagation des ondes ultrasoniques en fonction des composants du béton (granulats, ciment, adjuvants ...etc) ou bien des variations des propriétés physiques du matériau (le volume des vides, l'humidité, les défauts de mise en œuvre, le compactage du matériau ...etc).

2.10.1.1 Les granulats

La présence des granulats au sein de la matrice cimentaire est une source importante de multidiffusion. Cette multidiffusion dépend de la densité, la forme et la nature des granulats. Sa présence complexifie l'interprétation des résultats liés à la propagation des ondes dans le béton [2]. L'effet des granulats sur la propagation des ondes ultrasoniques est étudié dans différentes études [102-111].

L'influence de la taille des granulats est étudiée par Abo-Qudais et al. [105]. Ils indiquent que la vitesse des ondes ultrasonores dans le béton diminue à mesure que la taille des gros granulats utilisés augmente. Cet effet est plus important avec un rapport Eau/Ciment plus élevé. Berriman et al. [106] ont montré une forte corrélation linéaire positive entre la teneur en granulats et la vitesse ultrasonique. Par conséquent, la quantité de granulats n'affecte pas les vitesses ultrasoniques et la résistance du même degré [109]. Les chercheurs Trtnik et al. [111] ont découvert que pour le même niveau de résistance, les bétons avec la plus grande teneur en granulats auront probablement la vitesse d'impulsion la plus élevée. Selon Solís-Carcaño [110], la vitesse d'impulsion est un indicateur de la qualité des granulats utilisés.

Jones [108] a rapporté que pour une même composition de béton et une même résistance à la compression, le béton composé avec de granulats roulés a la plus faible vitesse de propagation. Par contre les granulats concassés donnent une valeur plus élevée de cette vitesse.

Bogas et al. [102] ont étudié l'introduction des granulats légers dans le béton, qui ont un plus grand impact sur l'élasticité que sur la densité, cela conduit à une réduction des UPV. Pour une résistance à la compression donnée, plus la densité de ce type de granulats est faible, plus l'UPV est élevé. Les mêmes auteurs ont conclu que l'absence des gros granulats conduit à une réduction des UPV dans les bétons de densité normale avec un inverse effet dans les bétons légers.

Albano et al. [103] ont utilisé les granulats de caoutchouc (0,59 et 0,29 mm) comme substitution des granulats fins dans le béton. Lorsque la proportion du poids augmentait et que la taille des particules du caoutchouc diminuait, les diminutions obtenues pour la vitesse des ultrasons peuvent dépasser les 50% pour une substitution de 10% en poids.

2.10.1.2 Le rapport Eau/Ciment

L'un des facteurs affectant la performance du béton est le rapport Eau/Ciment (E/C). La dépendance du rapport E/C sur la vitesse des impulsions ultrasoniques pour le béton et le mortier a également été étudiée [105, 109, 112-115].

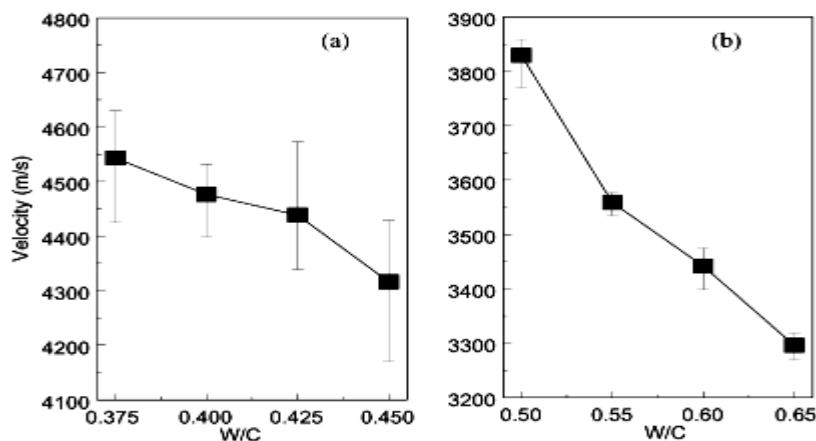


Figure 2.7. Effet du rapport E/C sur la vitesse ultrasonique (a) béton, (b) mortier [113].

L'unanimité des chercheurs admettent dans la littérature que l'augmentation du rapport E/C provoque une réduction des vitesses. Cet effet peut s'expliquer par le fait que l'augmentation du rapport E/C provoque une augmentation du volume des vides capillaires et des microfissures dans la zone de transition du béton, entraînant une réduction de la capacité du béton à transférer des ondes ultrasonores [105].

2.10.1.3 Les additions

Les adjuvants influencent approximativement la vitesse de propagation de la même manière que le taux d'hydratation. L'addition du chlorure de calcium par exemple réduit le temps de durcissement du béton et fait augmenter la valeur de la vitesse de propagation [116].

Demirboga et al. [117] ont étudié l'effet du remplacement du ciment portland par les cendres volantes (FA) et le laitier de haut fourneau (BFS) sur la vitesse ultrasonique.

Les valeurs des vitesses des impulsions ultrasoniques ont diminué avec l'augmentation du pourcentage de remplacement des cendres volantes, en particulier à jeune âge.

Le laitier de haut fourneau a également provoqué la réduction des vitesses à toutes les périodes de durcissement. Cependant, cette réduction était inférieure à celle des cendres volantes pour chaque période de cure et chaque pourcentage de remplacement [117].

La diminution des vitesses due au remplacement partiel du ciment par des cendres volantes est étudiée aussi par Rao et al. [118]. Ils concluent que ceci est attribué à la moindre résistance des cendres volantes par rapport au ciment. Benaïcha et al. [119] ont étudié l'influence des fibres métalliques sur l'évolution des vitesses pour le béton auto-compactant de haute performance. Des vitesses plus élevées du béton fibreux (HPFRC) que celles obtenues dans le

cas du béton non fibré (HPC). Une amélioration de la vitesse de 80% dès le plus jeune âge. L'ajout de fibres (pour un dosage inférieur ou égal à 2,5%) permet d'augmenter la raideur du béton, entraînant l'amélioration de la vitesse ultrasonore. Dans le cas des HPC, la vitesse moyenne des ultrasons, à 28 jours, pour les modes de transmission directe, semi-directe et indirecte est de l'ordre de 5395, 5953 et 6208 m/s, respectivement. Comparé à HPFRC avec 2,5% de fibres, cette vitesse ultrasonique est de l'ordre de 5601, 6069 et 6567 m/s, pour les mêmes modes de transmission respectivement [119].

2.10.1.4 L'âge du béton

L'effet de l'âge du béton sur la vitesse d'impulsion est semblable à son effet sur le développement de la résistance à la compression. La vitesse des impulsions ultrasoniques augmente avec l'augmentation du temps de durcissement [102, 105, 109, 112, 114, 119]. Cette augmentation est un développement naturel dû à l'augmentation de la rigidité par la réaction d'hydratation [119].

En effet, comme la vitesse des impulsions dans les vides est plus faible que celle des matières solides, plus l'hydratation de la pâte est importante, plus le volume des pores est faible et plus la vitesse est élevée [102, 105]. L'effet de l'âge de durcissement est rapide dans les premiers jours et continue à un rythme plus lent ensuite [105, 108].

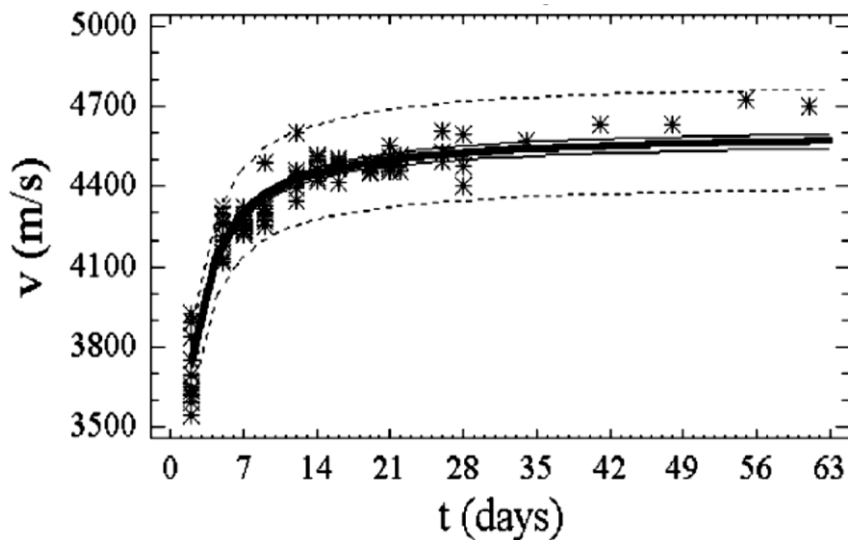


Figure 2.8. Évolution temporelle des vitesses ultrasoniques [114].

2.10.1.5 Température

Les variations de température du béton entre 5 et 30 ° C n'affectent pas significativement les mesures de la vitesse dans le béton. À des températures comprises entre 30 et 60°C, la vitesse

d'impulsion peut être réduite jusqu'à 5%. En dessous de la température de congélation, l'eau libre gèle dans le béton, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse d'impulsion jusqu'à 7,5% [120].

2.10.1.6 Teneur en eau

La teneur en eau se rapporte au taux volumique d'eau libre présent dans le réseau des pores du béton. Elle peut être comprise entre 4 et 14%.

Différentes études montrent que la vitesse ultrasonique est proportionnelle au taux de la teneur en eau du béton [121, 122]. La vitesse de propagation des impulsions ultrasonores à travers le béton diminue presque linéairement à mesure que la teneur en eau diminue.

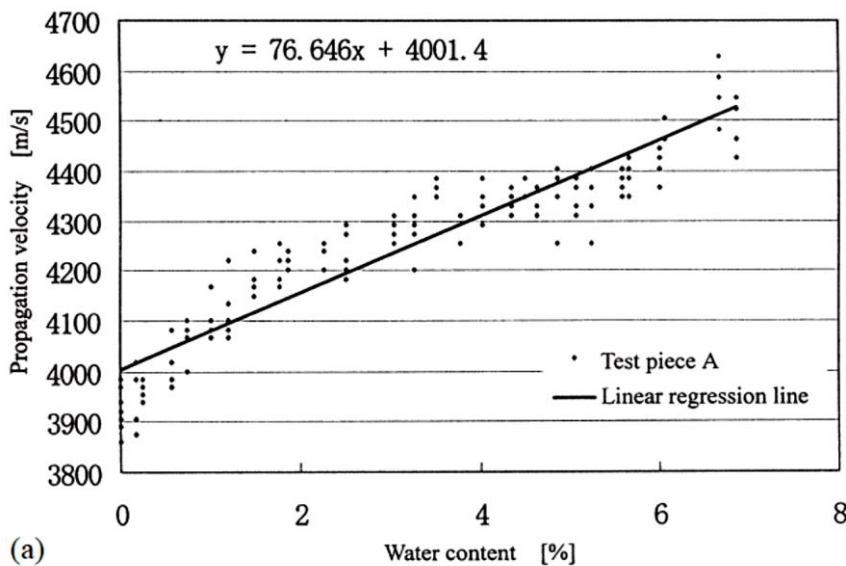


Figure 2.9. Relation entre la vitesse ultrasonique et la teneur en eau.

2.10.1.7 Teneur en air

L'influence du volume des vides sur la vitesse de propagation des ondes a été étudiée par plusieurs auteurs [123 - 125].

Zhu et al. [125] ont étudié l'effet des vides d'air sur la propagation des ondes ultrasonores P et S dans les pâtes de ciment fraîches avec différentes teneurs en vides d'air (0,1% à 5,3% en volume de ciment). Ils ont constaté que la vitesse des ultrasons P est fortement affectée par les vides d'air dans les pâtes de ciment à jeune âge.

En introduisant diverses quantités d'agent entraînant l'air, de 0 à 0,6% en poids du ciment, Kmack [123] a également étudié les effets des vides d'air sur la propagation des ultrasons P dans les pâtes de ciment fraîches. Ils constatent que les ondes ultrasonores dans les

échantillons entraînés d'air présentait une vitesse d'onde et une amplitude de signal significativement plus faibles aux premiers âges que les échantillons non entraînés d'air.

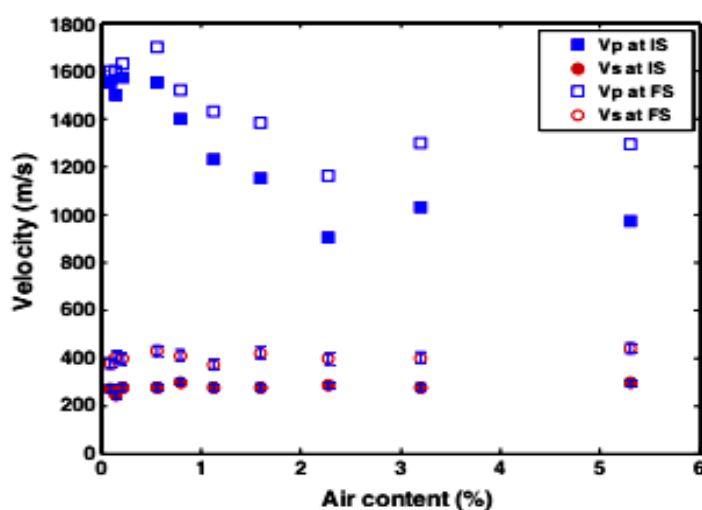


Figure 2.10. Effet de la teneur en air sur la vitesse ultrasonique [125].

2.10.1.8 Les barres d'armature

L'un des facteurs les plus importants influençant la vitesse d'impulsion est la présence de barres d'armature. La vitesse d'impulsion mesurée en acier est égale à 1.4 à 1.7 fois la vitesse en béton simple. Alors il est préférable quand il est possible, d'éviter de tester à l'endroit de présence des barres de renfort [116]. Lorsque ceci est inévitable il faut alors corriger en affectant de facteurs de correction ; qui sont recommandés par la RILEM [126] et les British Standards [116].

2.10.1.9 Diamètres, fréquences et positionnement des transducteurs

La nature du contact du transducteur par rapport à la surface de l'élément à tester a une grande influence sur la valeur des vitesses de propagation. Un contact impropre ou insuffisant réalisé peut mener à des lectures erronées de la vitesse de propagation [116].

Benouis et Grini [127] ont étudié l'effet du diamètre des transducteurs sur la vitesse ultrasonique. Où deux différents transducteurs, de diamètre $d = 7,5$ mm et $D = 49,5$ mm ont été utilisés. Ils ont constaté que les vitesses déterminées par les transducteurs "D" sont toujours supérieures à celles déterminées par les transducteurs "d".

L'objectif général de la recherche réalisé par Mehamdia et Benouis [128] est de trouver une corrélation fiable entre la vitesse ultrasonique et la perméabilité des bétons, d'où l'impact de la taille et de la fréquence des capteurs de contact sur cette corrélation. Ils ont conclu que

l'augmentation du diamètre des transducteurs améliore les corrélations entre la vitesse et la perméabilité. Tandis que l'augmentation de la fréquence des transducteurs n'a pas d'influence importante sur l'amélioration de la corrélation vitesse / perméabilité.

Pour le mode de transmission (position des transducteurs) Benaïcha et al. [119] ont conclu que les valeurs de la vitesse ultrasonique dans le cas du mode de transmission indirecte sont élevées par rapport aux vitesses mesurées dans le cas du mode de transmission semi-direct. Cependant, dans ce dernier cas, les vitesses mesurées sont élevées par rapport à celles du mode de transmission directe.

2.10.2 Caractérisation ultrasonique des propriétés des bétons

2.10.2.1 Résistance à la compression

La vitesse d'impulsion ultrasonore dans les matériaux à base de ciment dépend principalement de son module d'élasticité qui est lié étroitement à la résistance mécanique, il est naturel de croire que la vitesse d'impulsion peut également être corrélée à la résistance à la compression (R_c) [109,111].

La prédiction de la résistance à la compression du béton en utilisant une vitesse ultrasonique a été étudiée dans différentes recherches. [102, 109, 111, 112, 114, 117, 118, 119, 121, 129, 130].

Bien qu'il n'existe pas de relation physique directe entre la résistance à la compression du béton et la vitesse ultrasonique de propagation ; la résistance peut être évaluée en établissant au préalable des courbes graphiques corrélant les deux paramètres.

La relation entre la vitesse et la résistance n'est pas unique et peut être affectée par différents paramètres comme ceux précédemment cités pour la vitesse ultrasonique.

Trtnik et al. [111] ont étudié l'influence de la teneur, la taille, et le type des granulats sur la cette relation. Ils ont observé que les caractéristiques des granulats sont très importantes pour prédire avec précision la résistance à la compression du béton sur la base de la mesure de la vitesse.

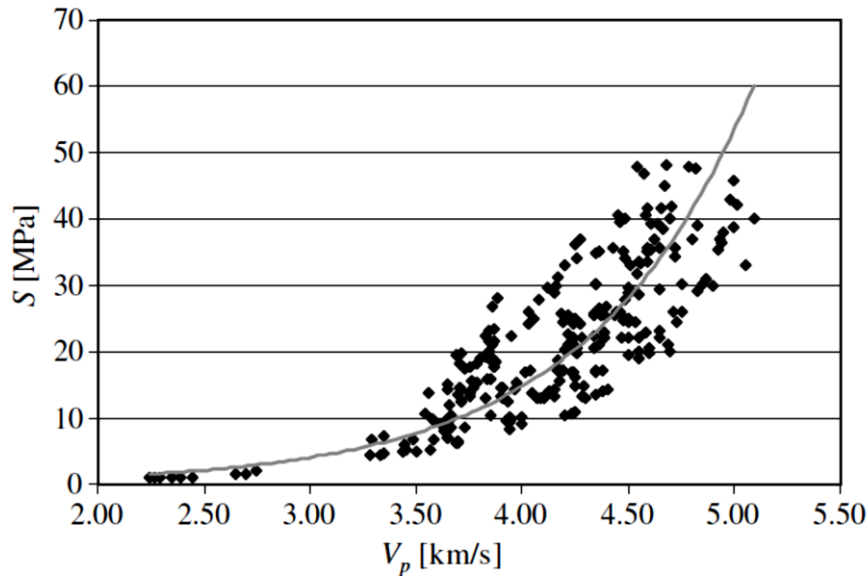


Figure 2.11. Relation entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression [111].

Bogas et al. [102] concluent une relation exponentielle entre la vitesse et la résistance à la compression avec une faible corrélation lorsque différentes compositions (types de granulats et âges des essais) sont considérées simultanément. Par conséquent, lorsque ces facteurs sont analysés séparément, il y a une augmentation du coefficient de corrélation.

Rìo et al. [114] confirment qu'il existe une relation exponentielle entre la résistance à la compression et la vitesse longitudinale de propagation des ultrasons. Les deux variables dépendent de manière significative du rapport E/C et de la teneur de gravier dans les échantillons.

Demirboga et al. [117] proposent une relation exponentielle entre UPV et la résistance à la compression de forme $Rc = ae^{bUPV}$ avec un coefficient de corrélation élevé (0,96). Belaribi et Mellas [130] ont trouvé aussi une relation exponentielle pour le béton mélangé avec des fibres de polypropylène. L'analyse de cette étude a montré que les paramètres qui influencent significativement la résistance du béton fibré peuvent influencer de la même manière la vitesse des ultrasons.

Malgré les résultats présentés ci-dessus, certains autres auteurs n'ont pas trouvé de bonne corrélation entre la vitesse et la résistance pour les matériaux cimentaires [131-133]. La prédiction de la résistance des matériaux cimentaires basée sur la technique des vitesses ultrasoniques dépend non seulement de leur constitution mais également du processus de fabrication [109, 134].

2.10.2.2 Porosité

La porosité du béton a une incidence sur la propagation des ondes ultrasoniques. L'augmentation de la porosité diminue ainsi les vitesses de propagation des ondes ultrasoniques dans le béton [121, 127, 135- 142].

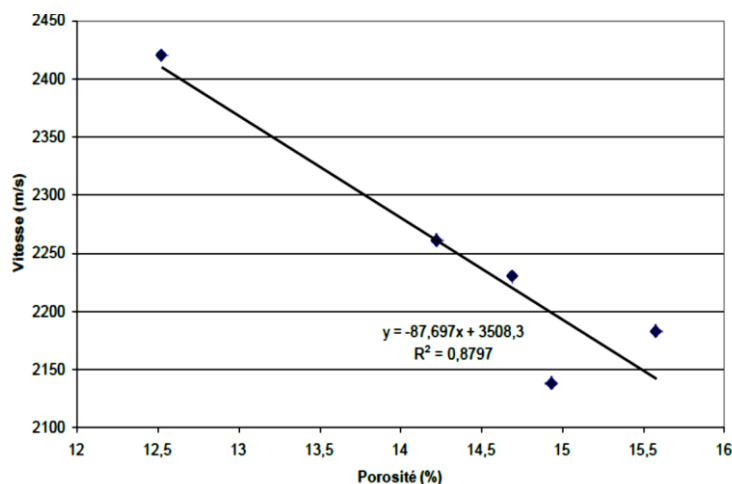


Figure 2.12. Variation de la vitesse ultrasonique en fonction de la porosité [121].

Hernandez et al. [138] ont créé un modèle de micromécanique du mortier, qui permet une estimation de la porosité à partir de mesures de vitesses longitudinales et de cisaillement.

Goueygou et al. [136] ont abouti à des corrélations linéaires avec un faible coefficient de détermination entre vitesse et porosité d'un mortier sec et complètement saturé en propagation de surface. Ces valeurs signifient que la propagation de l'onde de Rayleigh est influencée par d'autres caractéristiques qui comprennent la rugosité de surface, les petites fissures de surface causées par le traitement des échantillons.

Benouis et Grini [127] ont étudié l'effet du diamètre des transducteurs sur la relation vitesse – porosité. Ils concluent que les vitesses acquises par les transducteurs de grand diamètre sont bien corrélées à la porosité que celles des transducteurs avec petit diamètre.

Soltani et al. [141] ont trouvé que les ondes de Rayleigh présentent une sensibilité élevée similaire à la porosité de la pâte de ciment. Ils montrent un bon ajustement linéaire avec un coefficient de corrélation supérieur à 0,9.

Haddad et al. [137] ont développé une technique ultrasonique pour estimer la porosité et la connectivité des pores des bétons de granulats recyclés (RCA). Pour tous les états de saturation (100%, 40%, 15%, 2%, 1% et 0%), la vitesse ultrasonique diminue avec l'augmentation du contenu RCA. Cette diminution était liée à la porosité, qui augmentait avec la quantité de RCA dans le béton [137].

La dépendance de la perméabilité à la porosité est très importante. En fait, 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.

Goueygou et al. [135] ont relié les paramètres physiques (porosité et perméabilité) et les paramètres acoustiques de mortiers sains et endommagés, secs ou saturés. Dans les mortiers sains, la vitesse ultrasonique diminue avec la porosité et la perméabilité. Tandis, pour les échantillons endommagés, aucune corrélation claire n'a pu être obtenue entre la porosité et la vitesse ultrasonique.

Mehamdia et Benouis [128] ont étudié l'impact de la taille et de la fréquence des transducteurs sur la relation entre la vitesse indirecte, l'atténuation, la perméabilité à l'air et à l'eau des bétons. L'augmentation du diamètre des transducteurs améliore les corrélations entre la vitesse et la perméabilité et entraîne une diminution des corrélations entre atténuation et perméabilité. Tandis que l'augmentation de la fréquence des transducteurs affecte négativement la corrélation atténuation-perméabilité et n'a pas d'influence importante sur la corrélation vitesse-perméabilité.

2.10.2.3 Dommages des bétons

Les ultrasons sont largement utilisés pour caractériser divers types d'endommagements du béton à l'origine de microfissurations. Plusieurs auteurs indiquent également des variations de vitesses qui diminuent globalement en fonction du niveau d'endommagement, et une atténuation qui augmente. Ces variations s'observent quel que soit le type d'ondes considérées [2, 143- 158].

La présence de microfissures dans le mortier a été étudiée par Aggelis and Shiotani [143,144] en introduisant des petites plaquettes de vinyle de différentes dimensions (de $15 \times 15 \times 0,2$ mm à $30 \times 30 \times 0,5$ mm) et différentes concentrations (de 1% à 10%). Des mesures de vitesses montrent également une relation linéaire entre le nombre de fissures et les vitesses des ondes de compression et de Rayleigh. Il est également montré que cette diminution est plus importante pour les ondes de surface que pour les ondes de volume et qu'elle est dépendante de la fréquence.

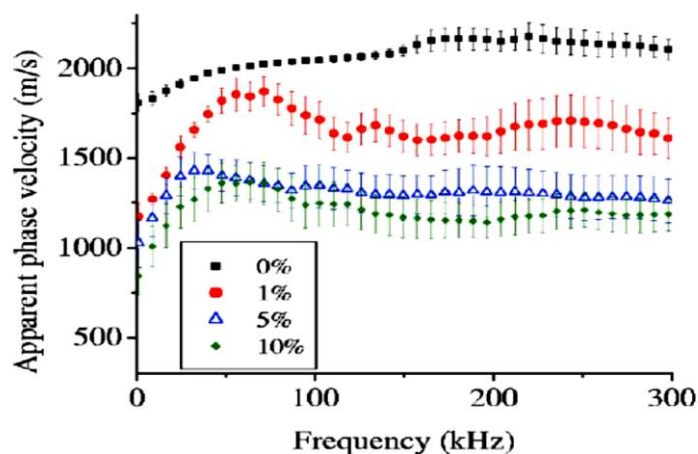


Figure 2.13. Vitesse de phase en fonction du pourcentage de fissures incluse dans le béton.

Une expérience a été menée aussi par Aggelis et al. [146], pour des fréquences de 200 kHz sur des fissures par flexion en trois points, à la différence que le contrôle se fait sur la surface opposée à l'ouverture de la fissure. Une diminution de la vitesse apparente des ondes en présence d'une fissure ouverte. La quantité de fissures influe également sur les vitesses des ondes de compression et de surface [146].

L'évaluation des dommages thermique par les vitesses ultrasoniques est étudiée dans différentes recherches [149, 151, 157, 158].

Hwang et al. [151] ont étudié les variations des vitesses dans les échantillons de béton soumis à un chauffage à haute température pendant une longue durée. Pendant le chauffage jusqu'à 300°C, la vitesse ultrasonique du béton était similaire à la vitesse à la température ambiante. Cependant, la vitesse du béton refroidi après le chauffage est nettement inférieure, car les fissures générées par le chauffage sont dilatées. Ils arrivent qu'il soit possible de surveiller les défauts à l'intérieur du béton, car il existe une forte corrélation entre l'augmentation de la largeur de la fissure et la diminution de la vitesse de l'impulsion ultrasonore [151].

Pour estimer l'homogénéité et la qualité du béton auto-plaçant SCC à un très jeune âge, une technique basée sur la vitesse ultrasonore a été adaptée par Benaïcha et al. [148]. D'après ces auteurs, quels que soit le point de mesure, l'heure de l'auscultation et le mode de transmission utilisé, la vitesse des ultrasons peut être utilisée pour évaluer la stabilité statique du béton auto-plaçant pour évaluer la capacité de remplissage du béton sans ségrégation en laboratoire [148].

2.11 Conclusion

Dans les années récentes, plusieurs méthodes dites non destructives sont de plus en plus utilisées comme des méthodes indépendantes ou associées avec les méthodes destructives pour caractériser les propriétés des matériaux. L'utilisation des ultrasons est un outil très adapté pour l'évaluation non destructive des bétons.

L'efficacité de cette technique pour caractériser les propriétés des bétons a été montrée dans plusieurs travaux. Ces études ont mis en évidence la sensibilité des ondes ultrasoniques à la variation des propriétés mécaniques des bétons. En effet, les caractéristiques de ces ondes (notamment les vitesses des impulsions ultrasoniques) subissent des modifications qui sont liées essentiellement à l'interaction de l'onde avec le matériau béton.

Alors, la connaissance fine de la propagation des ondes dans le béton et les avantages qu'elle pourra apporter sur le point de vue théorique deviennent essentiels pour envisager des contrôles sur site et faire des choix de procédures ou de paramètres de contrôle.

CHAPITRE 3

MATERIAUX ET PROCEDURES EXPERIMENTALES

3.1 Introduction

Les techniques ultrasonores comptent parmi les techniques d'essais non destructifs les plus répandues dans le domaine de génie civil. Néanmoins, le manque de compréhension de la propagation des ondes ultrasonores dans le béton -milieu hétérogène- est un frein à l'exploitation optimale de ces techniques.

Ce chapitre, présente des essais expérimentaux pour mettre en évidence l'évolution des vitesses ultrasoniques pour différents types de béton, béton ordinaire (BO), béton autoplaçant (BAP) et des bétons avec des granulats de caoutchouc (BOCs et BAPCs) .

Premièrement nous présenterons la caractérisation des matériaux de base pour la confection des bétons envisagés, le ciment, granulats, eau de gâchage, addition (fillers calcaires), adjuvant (superplastifiant (SP40)) et les granulats de caoutchouc.

Nous présenterons par la suite les procédures et techniques utilisées pour caractériser les bétons de l'étude à l'état frais et à l'état durci. A l'état frais, on déterminera l'affaissement et la teneur en air pour les BO et BOCs, et l'étalement, la teneur en air, l'essai de boîte en L et l'essai de stabilité aux tamis pour les BAP et BAPCs et aussi la masse volumique. A l'état durci, on déterminera la vitesse ultrasonique, la résistance à la compression et à la flexion, la porosité accessible à l'eau et la masse volumique pour les différents types de bétons.

3.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont des produits locaux ; il s'agit du ciment, des granulats (sable, graviers, granulats de caoutchouc), adjuvant, addition, et l'eau de gâchage.

3.2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment CPJ-CEM II/A 42.5 provenant de la cimenterie de Hadjar-Soud (wilaya de Skikda, Algérie), ses caractéristiques chimiques et physiques qui sont présentées dans le tableau 3.1, ont été fournies par le laboratoire de la cimenterie.

Tableau 3.1. Caractéristiques chimiques et physiques du ciment utilisé.

Caractéristiques chimiques		Caractéristiques physique	
CaO (%)	55 - 65	Densité (kg/l)	3,15
SiO ₂ (%)	22 - 28	Blaine (cm ² /g)	3300 - 4000
AL ₂ O ₃ (%)	5 - 6		
Fe ₂ O ₃ (%)	3 - 3,6		
MgO (%)	1 - 2		
K ₂ O (%)	0,3 – 0,6	Début de prise (mn)	≥ 60
Na ₂ O (%)	0,1 – 0,16	Fin de prise (mn)	150-250
SO ₃ (%)	1,8 – 2,5		
CaOL (%)	0,8 – 1,8		
cl ⁻	0 - 0,01		

3.2.2 Granulats

3.2.2.1 Sable

Nous avons utilisé un sable calcaire concassé de classe (0/4) provenant de la carrière de Boucelba, dans la wilaya de Guelma (Algérie).

3.2.2.2 Gravier

Pour l'élaboration des bétons, deux types de gravier calcaire concassé provenant de la carrière de Boucelba dans la région de Guelma, ont été utilisés. Il s'agit d'un gravier 3/8 (G1) et un gravier 8/16 (G2).

3.2.2.3 Granulats de caoutchouc

Les granulats de caoutchouc utilisés (GC), issus du broyage mécanique de pneus usagés, proviennent d'une manufacture située à Setif, Algérie (Douib Recyclage Caoutchouc), ils sont utilisés en substitution volumique du sable. Leurs masses volumiques absolues et apparentes sont de 0.98 et 0.52 g/cm³ respectivement.

Les distributions granulométriques des quatre granulats utilisées (sable, graviers et GC) sont présentées sur la figure 3.1.

Les caractéristiques physiques des granulats (sable, graviers, granulats de caoutchouc(GC)) utilisées dans cette étude sont regroupées dans le tableau 3.2 qui suit :

Tableau 3.2. Caractéristiques des granulats utilisés.

Caractéristiques	Sable (0/4)	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)	G.C
Masse volumique absolue (g/cm ³)	2,63	2,65	2,70	0,98
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,50	1,53	1,57	0,52
Module de finesse (%)	3,54	/	/	/
Equivalent du sable visuel (%)	76,07	/	/	/
Equivalent de Sable au piston (%)	71,25	/	/	/

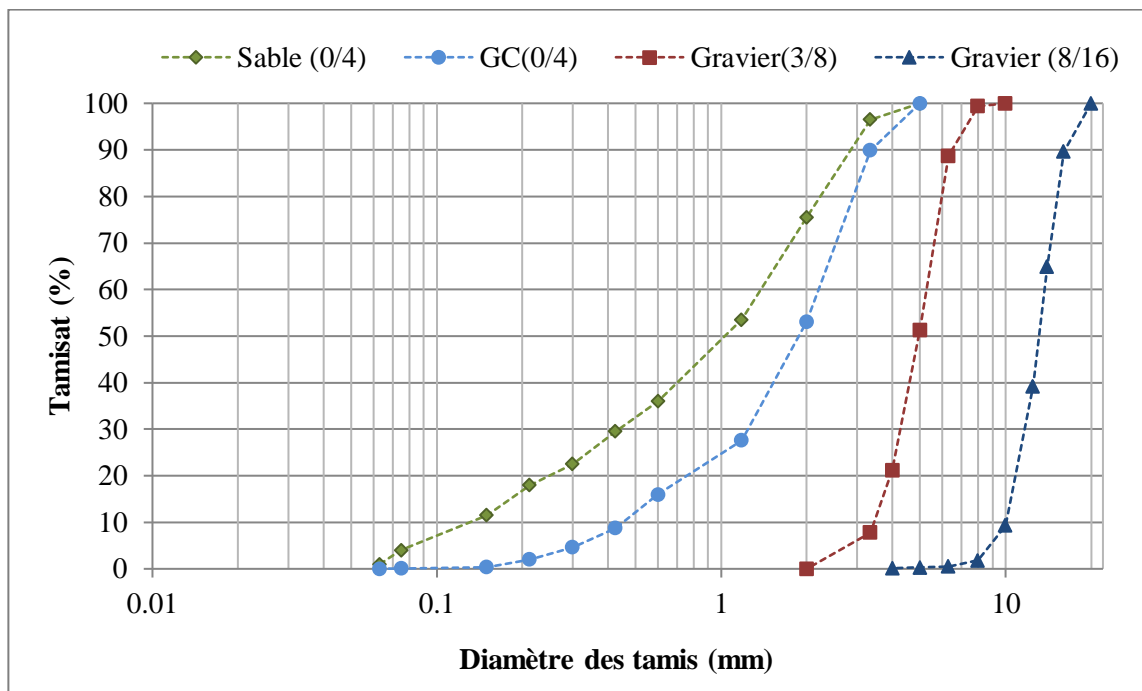


Figure 3.1. Distributions granulométriques des granulats



Figure 3.2. Granulats utilisées

3.2.3 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.

3.2.4 Adjuvant

Le superplastifiant MEDAPLAST SP 40 produit par la société Granitex (Oued Smar, Algérie) a été utilisé. C'est un haut réducteur d'eau pour le béton prêt à l'emploi conforme à la norme EN 934-2 [159]. Sa plage d'utilisation recommandée varie de 0,6 à 2,5 % du poids du liant.


Il se caractérise par :

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

3.2.5 Additions

Afin de développer la partie liante du matériau cimentaire, une addition minérale couramment employée dans l'industrie du béton a été utilisée. Il s'agit du filler calcaire qui est un Carbonate de Calcium sous forme de poudre ($\text{CaCO}_3 = 98\%$) provenant de l'entreprise nationale des granulats ENG d'El-Khroub (wilaya de Constantine), dont les principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 3.3 et elles ont été communiquées par le laboratoire de l'entreprise.

Tableau 3.3 Caractéristiques du filler de calcaire utilisé.

Caractéristiques chimiques		Caractéristiques physique		 <p>Figure 3.3. Filler de calcaire</p>
CaCO ₃ (%)	98	Masse volumique réelle (g/cm ³)	2,7	
SiO ₂ (%)	0,04			
Na ₂ O (%)	0,05			
MgO (%)	0,17	Masse volumique en vrac (g/cm ³)	1,11	
Al ₂ O ₃ (%)	0,03			
Fe ₂ O ₃ (%)	0,02			
K ₂ O (%)	0,02			
P ₂ O ₅ (%)	0,008	Valeur de bleu de méthylène MB _f (gr/kg)	1,67	
TiO ₂ (%)	0,009			
Chlorure	0,0033			
SO ₃ (%)	0,19			
Soufre totale	0,0137			
Résidu insoluble	1,15			
Ph	9			

3.3 Formulation des différents bétons

Quatre types de béton ont été utilisés dans cette étude :

- Un béton ordinaire (BO) ;
- Un béton autoplacant (BAP) ;
- Des bétons ordinaires avec des substitutions du sable par les granulats de caoutchouc (BOCs) ;
- Des bétons autoplaçants avec des substitutions du sable par les granulats de caoutchouc (BAPCs).

3.3.1 Formulation des bétons ordinaires (BO et BOCs)

La formulation des bétons ordinaires utilisés est celle de Dreux-Gorisse dreux et Festa [1] qui repose sur l'utilisation des courbes granulaires de référence. Un rapport Eau/Ciment (E/C) a été adopté (E/C = 0,5). Pour les bétons ordinaires caoutchoutés (BOCs) la même méthode de formulation a été utilisée avec le même rapport E/C. Quatre taux de substitution en volume du sable par les granulats de caoutchouc (5, 10, 15, et 20%). A cet effet, un mélange du BO et quatre autres du BOCs ont été préparés : BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20%.

Les compositions obtenues sont présentées dans le tableau 3.4 ci-après.

Les constituants du béton ont été introduits dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie et ont été mélangés à sec pendant 1 min. L'eau a été ensuite introduite pendant une minute et le malaxage poursuivi durant deux minutes, ce qui donne une durée totale de malaxage de 4 min.

Avant le coulage, une variété des essais ont été effectués pour déterminer les propriétés du BO et des BOCs à l'état frais, il s'agit de :

- *L'affaissement au cône d'Abrams* (EN 12350-2) [160] a pour but de déterminer le degré de plasticité d'un béton ce que l'on appelle la classe de consistance. Cet essai est effectué sur un moule tronconique en 3 étapes : on remplit le moule par le béton frais, on démoule et enfin on mesure la hauteur de l'affaissement (figure 3.4.a).
- *La teneur en air* (EN 12350-7) [161] qui a pour objet de déterminer le pourcentage d'air occlus créé lors du malaxage dans un béton frais, à l'aide d'un aéromètre à béton (Figure 3.4.b). Le béton frais est rempli sous vibration dans un récipient de 8 litres. La masse volumique du béton à l'état frais est déterminée après cette étape. Ensuite le récipient est fermé hermétiquement à l'aide d'un couvercle muni d'une chambre de compression. Une

pression définie est introduite dans la chambre de compression, l'aéromètre est taré, puis la pression est appliquée sur le béton. La teneur en air est la différence de pression lue sur le manomètre, exprimée en %.



(a)



(b)

Figure 3.4. Caractérisation du BO et des BOCs à l'état frais

(a) l'affaissement au cône d'Abrams, (b) teneur en air et la masse volumique

Tableau 3.4. Compositions du BO et des BOCs .

Compositions (kg/m ³)	BO	BOC 5%	BOC 10%	BOC 15%	BOC 20%
Gravier 8/16	978,27	978,27	978,27	978,27	978,27
Gravier 3/8	177,81	177,81	177,81	177,81	177,81
Sable 0/4	635,27	603,51	571,74	539,98	508,22
Ciment	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Caoutchouc	0,00	11,84	23,67	35,51	47,34
E/C	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Eau	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00

3.3.2 Formulation des bétons autoplaçants

Pour la formulation du BAP et des BAPCs, on a suivi les recommandations de l'AFGC [14] qui permettent de garantir l'autoplaçabilité du béton. Il s'agit de choisir les proportions des constituants dans 1 m³ de béton sur la base des paramètres suivants (on conservant quelques paramètres des bétons ordinaires (dosage en ciment, rapport E/C)) :

- Un rapport Gravier/Sable l'ordre de 1 (1,14) ;
- Un dosage en fines plutôt élevé et par suite un volume important de la pate ;
- Un pourcentage déterminé en addition (filler) ;

- Un dosage en adjuvant (SP) voisin du dosage de saturation.

Les formulations ainsi obtenues du BAP et des BAPCs sont présentées dans le Tableau 3.5 ci-dessous.

Tableau 3.5. Compositions du BAP et des BAPCs.

Compositions (kg/m ³)	BAP	BAPC 5%	BAPC 10%	BAPC 15%	BAPC 20%
Gravier 8/16	545,00	545,00	545,00	545,00	545,00
Gravier 3/8	356,00	356,00	356,00	356,00	356,00
Sable 0/4	789,00	749,55	710,10	670,65	631,20
Ciment	400,00	400,00	400,00	400,00	400,00
Filler (20%)	80,00	80,00	80,00	80,00	80,00
SP (1,6%)	6,40	6,40	6,40	6,40	6,40
Caoutchouc	0,00	14,70	29,40	44,10	58,80
E/C	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Eau	200,00	200,00	200,00	200,00	200,00
G/S	1,14	1,18	1,22	1,26	1,30

Les constituants du béton ont été introduits dans le malaxeur par ordre décroissant de granulométrie et ont été mélangés à sec pendant 1min. 60% de la quantité totale de l'eau de gâchage est ajoutée et mélangée pendant 1 min. La quantité restante de l'eau de gâchage (40%) est mélangée avec le superplastifiant est ajouté pendant 0.5 min. Enfin, le mélange des BAPs est mixé pendant 1.5 min supplémentaires, résultant en une durée totale de malaxage de 4 min. Cinq (5) mélanges différents ont été préparés : BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%.

Avant le coulage, et en plus de l'essai de la teneur en air et la masse volumique à l'état frais (Figure 3.5.d) (cité dans le cas du béton ordinaire), trois essais ont été effectués pour caractériser les BAPs à l'état frais comme recommandé par l'AFGC [14] :

- **Essai d'étalement au cône d'Abrams** (Figure 3.5.a), qui permet de caractériser la fluidité et la mobilité du béton en milieu non confiné, par la mesure du diamètre moyen d'une galette de béton après soulèvement du cône ;
Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP (pas de ségrégation visible en fin d'essais c'est-à-dire pas d'amoncellement de gros granulats ni d'auréole de laitance) [14].



a) Étalement au cône d'Abrams



b) Essai de stabilité au tamis



c) Boîte en L



d) Teneur en air et la masse volumique

Figure 3.4. Caractérisation du BAP et des BAPCs à l'état frais

- **Essai de la boîte en L** (Figure 3.5.b), qui permet d'évaluer le risque de blocage et la capacité de remplissage du béton en milieu confiné, par la mesure du rapport des hauteurs H_2/H_1 qui doit être supérieur à 0.8 ;

La méthode consiste à remplir la partie verticale de la boîte par le BAP. Après arasement, on laisse le béton reposer pendant une minute, puis on lève la trappe et on laisse le béton s'écouler dans la partie horizontale de la boîte à travers le ferrailage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferrailage réellement présent dans la structure). Après stabilisation de l'écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H_1) et horizontale (H_2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H_2/H_1 . Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP [6].

- **Essai de stabilité au tamis** (Figure 3.5.c), qui sert à qualifier les bétons autoplacants vis-à-vis du risque de la ségrégation. Il caractérise la stabilité des BAPs par la mesure du pourcentage en masse de laitance par rapport à la masse de l'échantillon qui doit être $\leq 15\%$. Les critères d'acceptabilité d'une formulation d'un béton autoplaçant sont divisés en trois classes :
 - $0\% \leq P_{\text{laitance}} (\%) \leq 15\%$: stabilité satisfaisante ;
 - $15\% < P_{\text{laitance}} (\%) \leq 30\%$: stabilité critique : essai de ségrégation à réaliser in situ ;
 - $P_{\text{laitance}} (\%) > 30\%$: stabilité très mauvaise : ségrégation systématique du béton [17].

3.4 Confection des éprouvettes et cures appliquées

Immédiatement après la fin du malaxage, le coulage a été effectué dans des moules préalablement huilés. Les moules remplis par le béton frais ont été ensuite recouverts par un film plastique jusqu'au démoulage. Après coulage, les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures, puis plongées dans l'eau à température ambiante pendant 28 jours. Ce type de conservation est le plus favorable vis-à-vis du processus d'hydratation du ciment.

Pour chaque type de béton, différentes éprouvettes ont été confectionnées selon l'essai à réaliser.

- Des éprouvettes de dimensions $(7 \times 7 \times 28)$ cm³ ont été confectionnées et conservées dans l'eau à température ambiante pour l'essai de flexion à 28 jours (Figure 3.6.a).
- Des éprouvettes de dimensions $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ ont été confectionnées et conservées dans l'eau à température ambiante pour l'essai de porosité à 28 jours (Figure 3.6.b).
- Des éprouvettes de dimension $(10 \times 10 \times 10)$ cm³ ont été confectionnées et conservées dans l'eau, l'eau de mer et une solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) à température ambiante pour les essais ultrasoniques et ceux de la résistance à la compression à 28, 90 et 180 jours (voir la remarque).



Figure 3.6. Formes des éprouvettes utilisées (a) 7x7x28 cm³, (b) 10x10x10 cm³

Il est à noter que pour les différents mélanges de béton, trois éprouvettes ont été utilisées pour chaque essai.

❖ **Remarque sur les cures appliquées**

Après la durée de cure dans l'eau pendant 28 jours (temps zéro), les éprouvettes de béton destinées aux essais ultrasoniques et ceux de la résistance à la compression, sont immergées dans trois solutions, eau, eau de mer et une solution du sulfate de sodium Na₂SO₄ pendant 90 jours et 180 jours (Figure 3.7).



Figure 3.7. Les trois modes de cure.

L'eau de mer utilisée provient de la mer méditerranée, son pH est de 8 et sa salinité est de 38,4 - 41,2 g/L [162].

La solution du sulfate de sodium Na_2SO_4 est d'une concentration de 5% et de pH = 11.

Cette concentration est souvent choisie dans la littérature. Ces solutions (eau de mer et Na_2SO_4) sont renouvelées chaque mois.

3.5 Caractérisation des bétons durcis

3.5.1 Méthodologie de l'UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

L'objectif principal pour cette étude s'articule sur la mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques (Ultrasonic Pulse Velocity « UPV ») pour différents types de bétons et leurs conservations.

La méthodologie des essais s'appuie sur la norme européenne EN 12504-4 [163]. Le dispositif comprend un générateur d'impulsions ultrasonores 58-E0049/B (Controls) qui mesure la durée écoulée entre le départ d'une impulsion générée par le transducteur-émetteur et son arrivée au transducteur-récepteur. Trois types de transducteurs sont utilisés dans cette étude, qui se différencient par leurs diamètres et leurs fréquences (voir la Figure 3.8 et Tableau 3.6).

Un barreau de calibrage est fourni pour permettre d'obtenir une ligne de référence du mesurage de la vitesse.

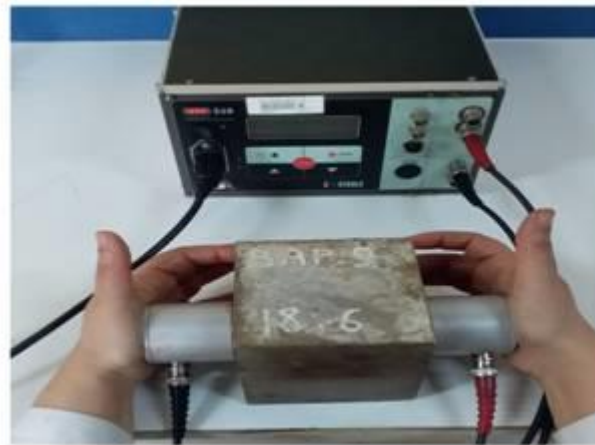


Figure 3.8. Dispositif ultrasonique et transducteurs utilisés.

Tableau 3.6. Caractéristiques de différents transducteurs utilisés.

Transducteurs	Diamètre (mm)	Fréquence (khz)
A	49	54
B	49	25
C	7	54

Les mesures des vitesses ultrasoniques ont été prises - pour les éprouvettes des bétons à l'état saturé - après 28, 90 et 180 jours de cure dans les trois solutions (eau, eau de mer et Na_2SO_4). Avant de commencer l'essai, la surface de l'éprouvette est essuyée avec un papier absorbant. L'essai ultrasonique a été effectué selon le mode de transmission directe dans le sens perpendiculaire au sens de coulage du béton (Figure 3.9). Pour assurer un bon contact, une fine couche de couplant a été placée sur l'interface entre les transducteurs et le béton.

**Figure 3.9.** Position des transducteurs en mode de transmission direct.

3.5.2 Résistance à la compression

La résistance à la compression R_c est l'une des propriétés les plus importantes du béton. L'évaluation de la résistance à la compression est réalisée selon la norme NF EN12390-3 [164], sur des éprouvettes cubiques de $(10 \times 10 \times 10) \text{ cm}^3$ de dimensions (Figure 3.10).

Après avoir terminé les mesures des vitesses ultrasoniques, ces éprouvettes sont alors préparées pour l'essai de la résistance à la compression.

Les résistances ont été obtenues par écrasement des éprouvettes avec une presse d'une capacité maximale de 3000 kN, et une vitesse de chargement de 0,5 MPa/s.



Figure 3.10. Essai de résistance à la compression.

Les échéances d'essais sont 28 jours de cure dans l'eau, 90 et 180 jours de cure dans l'eau, l'eau de mer et la solution de sulfate de sodium (Na_2SO_4) à température ambiante du laboratoire. Le résultat final de R_c est la moyenne des trois résultats des essais de la contrainte de rupture.

3.5.3 Résistance à la flexion

Pour chaque type de béton, trois éprouvettes de dimension $(7 \times 7 \times 28) \text{ cm}^3$ ont été testées en flexion simple - après une cure de 28 jours dans l'eau - sur une machine d'essais en flexion (3 points) de marque "CONTROLS" selon la norme NF EN 12390-5 [165] (Figure 3.11).

Après la sélection d'une vitesse de chargement constante de $0,05 \text{ MPa/s}$. Une charge sans choc est appliquée avec un accroissement continu jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

Le résultat final de R_f est la moyenne des trois mesures de trois essais à la flexion.

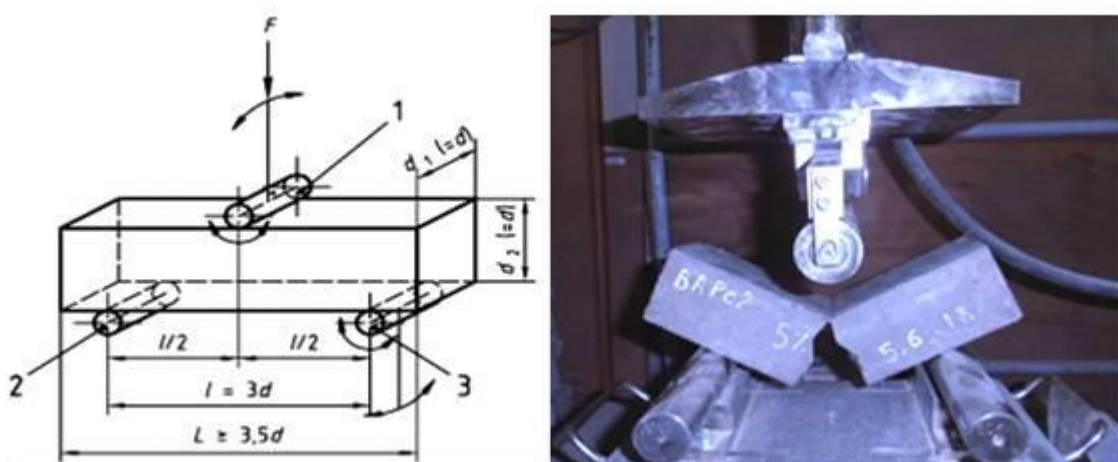


Figure 3.11. Essai de résistance à la flexion.

3.5.4 Porosité accessible à l'eau

La porosité accessible à l'eau est un paramètre de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité des bétons. Parmi les méthodes à disposition, la détermination de la porosité accessible à l'eau par pesée hydrostatique selon le mode opératoire est une mesure simple et praticable (Figure 3.12).

La porosité accessible à l'eau a été mesurée suivant la norme NF EN 18-459 [166]. Il s'agit de mesurer le pourcentage des vides connectés avec la surface, à l'intérieur de la masse du béton, pour les éprouvettes (10 x10 x 10) cm³, conservées dans l'eau à température ambiante jusqu'à l'échéance de 28 jours, à l'aide d'une balance hydrostatique (précision de 0.01 g),

Cette propriété est mesurée selon la formule suivante :

$$P_{eau} = \frac{M_{air} - M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \times 100 \quad (3.1)$$

M_{air} : Pesée dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau ;

M_{eau} : Pesée hydrostatique masse pesée sous l'eau ;

M_{sec} : Pesée dans l'air de l'éprouvette sèche (après séchage à T = 105°C jusqu'à masse constante (2 pesées espacées de 24 h ne s'écartent pas plus de 0,05%).

A partir de ces données, il est possible d'accéder à la masse volumique apparente des éprouvettes à l'état sec par la formule suivante :

$$M_V = \frac{M_{sec}}{M_{air} - M_{eau}} \quad (3.2)$$



(a)



(b)

Figure 3.12. Essai de porosité accessible à l'eau

(a) séchage des éprouvettes dans l'étuve, (b) mesure de la porosité.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons d'abord donné les principaux résultats des essais de caractérisation des différents matériaux utilisés et leurs proportions nécessaires pour la fabrication des différents mélanges :

- béton ordinaire (BO) ;
- bétons ordinaires caoutchoutés (BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20%) ;
- béton autoplaçant (BAP) ;
- bétons autoplaçants caoutchoutés (BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%).

Les méthodes de formulations des bétons prennent en compte les caractéristiques des matières premières utilisées. Les BO et BOCs ont été formulés selon la méthode de Dreux Gorisse alors que les BAP et BAPCs sont formulés en respectant les recommandations de l'AFGC. Nous avons présenté les différents essais pour la caractérisation des bétons à l'état frais et durci.

Les résultats et les discussions des essais des bétons aux états frais et durci (essais non destructifs et destructifs) sont présentés dans les chapitres suivants, en se concentrant sur l'objectif de cette étude qui est la caractérisation des bétons par la méthode des vitesses ultrasoniques.

CHAPITRE 4

PROPRIETES DES DIFFERENTS BETONS

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des propriétés des différents bétons et l'effet de l'incorporation des déchets de caoutchouc issus du broyage des pneus usagés. L'effet de cette substitution est prospecté à travers deux variétés de béton, un béton ordinaire et un béton autoplaçant avec quatre pourcentages de ce déchet. Les propriétés prospectées concernent les deux états des bétons (frais et durci).

4.2 Caractérisation des bétons à l'état frais

4.2.1 BO et BOCs

Les résultats des essais de caractérisation du BO et des BOCs à l'état frais sont présentés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Propriétés des BO et des BOCs à l'état frais.

Bétons	BO	BOC 5%	BOC 10%	BOC 15%	BOC 20%
Affaissement (cm)	7,67	8,00	9,83	10,67	11,83
	± 0.23	± 0.00	± 0.47	± 0.23	± 0.47
Teneur en air (%)	2,08	2,29	2,43	2,65	2,77
	± 0.069	± 0.062	± 0.048	± 0.031	± 0.063
Masse volumique état frais (Kg/m ³)	2398	2370	2336	2320	2306
	± 9.61	± 5.68	± 8.10	± 2.04	± 8.16

4.2.1.1 L'ouvrabilité

D'après les valeurs d'affaissements obtenues et présentées sur la figure 4.1 on peut dire que les bétons BO et BOCs ont un comportement plastique à très plastique. L'incorporation des granulats de caoutchouc (GC) dans le béton ordinaire a une influence directe sur le comportement du béton frais. Cette propriété augmente en augmentant la teneur en GC. On obtient une augmentation d'affaissement de 4, 27, 39 et 53% pour une substitution de 5, 10, 15, 20 % du sable par les particules de caoutchouc respectivement. Cela est conforme aux résultats des différents recherches [46, 76], par contre d'autres chercheurs concluent le contraire [41].

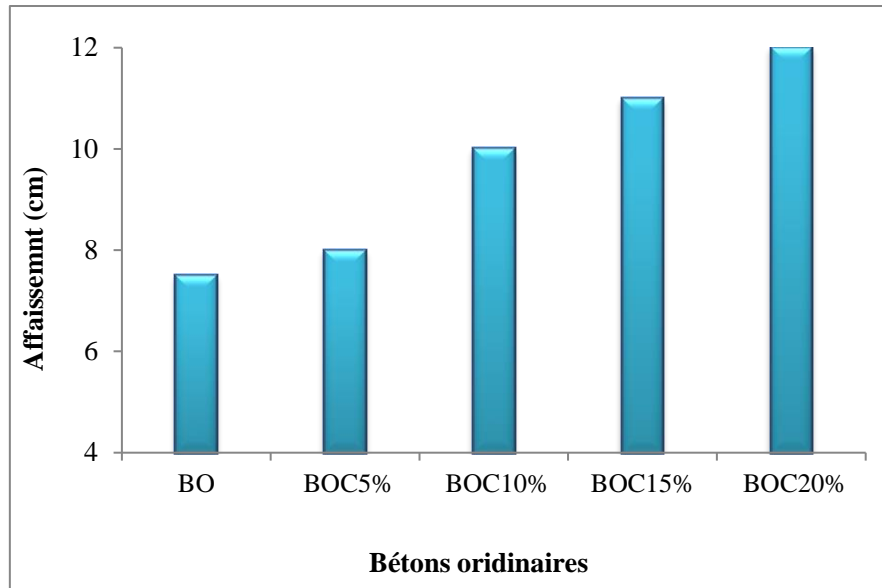


Figure 4.1. Affaissement des BO et BOCs.

L'augmentation de cette ouvrabilité des bétons caoutchoutés est due à la forme sphérique des GC même relativement en comparaison avec celle du sable issu du concassage [167]. Cette dernière entraîne une augmentation de la viscosité, ce qui nécessite moins d'eau pour obtenir un même affaissement qu'un béton sans GC. Ou bien on obtient un affaissement plus important avec le même rapport E/C.

4.2.1.2 Teneur en air & masse volumique à l'état frais M_{vf}

Ces deux propriétés ont été obtenues par le même essai. La substitution du sable par des granulats de caoutchouc, entraîne une augmentation de la teneur en air, par rapport au béton témoin BO. La majorité des chercheurs confirment ces résultats [43, 61, 64, 68, 69]. La substitution de 5, 10, 15 et 20% augmente la teneur en air de 10, 17, 27 et 33 % respectivement (Figure 4.2). Cette augmentation est due à la nature des particules de caoutchouc et à leur capacité à emprisonner l'air dans leur texture de surface dentelée [71].

Il est montré que durant le malaxage les G.C ont une capacité à piéger de l'air dans la rugosité de leur surface augmentant ainsi significativement le volume d'air dans le béton [168].

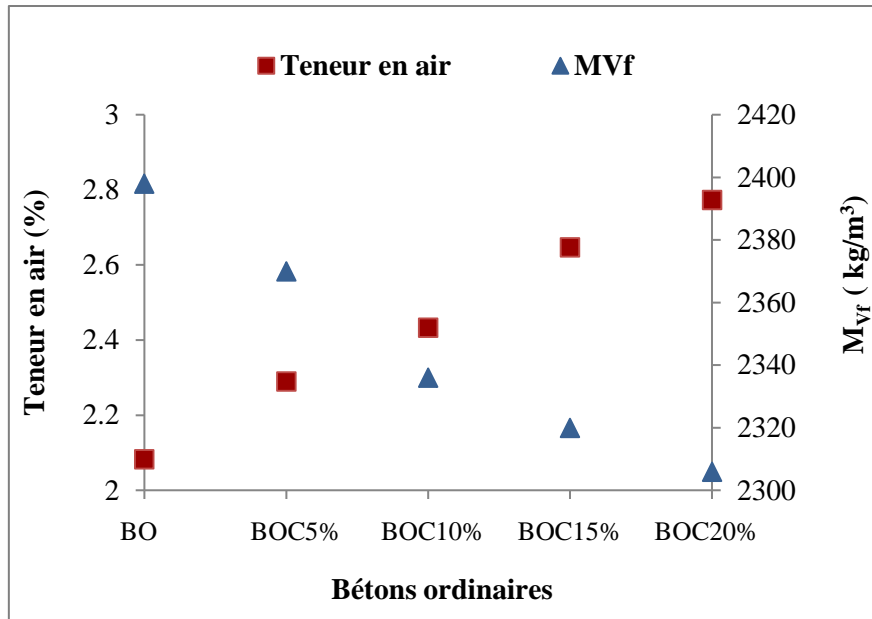


Figure 4.2. Teneur en air & Masse volumique à l'état frais M_{Vf} des BO et BOCs.

Par contre, une diminution de 1.1, 2.6, 3.2 et 3.8% de la masse volumique à l'état frais est observée, pour une substitution de 5, 10, 15 et 20% du sable par des GC respectivement. Cette diminution est due à la faible densité de ces granulats (0.98 g/cm³) par rapport aux granulats naturels (2.63 g/cm³), ainsi qu'à la grande teneur en air par rapport au béton témoin BO.

4.2.2 BAP et BAPCs

Les résultats des essais effectués pour caractériser les BAPs à l'état frais sont présentés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Propriétés du BAP et des BAPCs à l'état frais.

Bétons	BAP	BAPC 5%	BAPC 10%	BAPC 15%	BAPC 20%
Étalement (cm)	60,33 ± 0,62	61,66 ± 0,85	63,5 ± 1,08	66,16 ± 0,85	70,83 ± 0,85
Boite en L	0,82 ± 0,009	0,85 ± 0,014	0,92 ± 0,012	0,95 ± 0,006	0,97 ± 0,006
Stabilité au tamis (%)	3,11 ± 0,10	3,33 ± 0,12	3,90 ± 0,36	4,54 ± 0,25	5,27 ± 0,39
Teneur en air (%)	4,02 ± 0,06	4,26 ± 0,02	4,64 ± 0,06	5,15 ± 0,10	5,95 ± 0,14
Masse volumique état frais (Kg/m³)	2290 ± 8,48	2276 ± 7,48	2257 ± 6,34	2233 ± 10,80	2203 ± 10,42

4.2.2.1 Essai d'étalement au cône d'Abrams

L'étalement du béton autoplaçant BAP et bétons autoplaçants modifiées BAPCs est toujours dans la plage conseillée selon les recommandations d'AFGC (60 à 75 cm) [14], où aucune apparence de ségrégation est observée (pas d'amoncellement de gros granulats, ni d'auréole de laitance). Une augmentation d'étalement de 2.5, 4.9, 9.9 et 17.3 % pour les BAPC5%, BAPC10%, BAP15% et BAPC20% par rapport au béton témoin BAP (Figure 4.3). On peut constater que les bétons autoplaçants respectent le critère d'étalement.

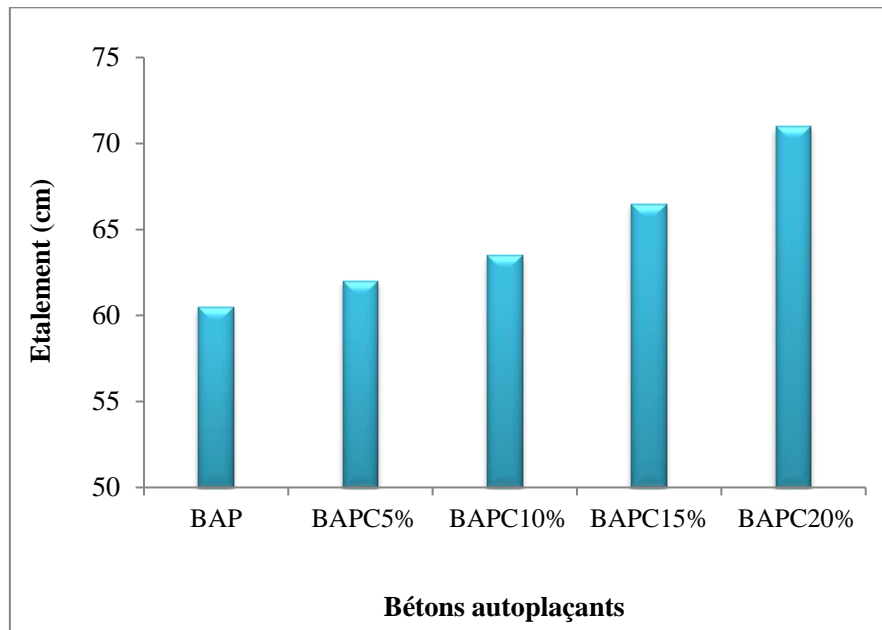


Figure 4.3. Etalement des BAP et BAPCs.

Cette augmentation de l'étalement des BAP avec l'augmentation de la substitution en GC est principalement due à la même cause de celle de l'affaissement des bétons ordinaires. La viscosité ajoutée par la forme des granulats de caoutchouc conduit à cette augmentation.

4.2.2.2 Essai de la boîte en L

La boîte en « L » permet de tester la mobilité du béton en milieu confiné et de vérifier que sa mise en place ne sera pas contrariée par des phénomènes de blocage.

On remarque que la capacité de remplissage requise pour les BAP et BAPCs est atteinte, elle dépasse les 80% recommandées [14]. La substitution de 5, 10, 15 et 20% de GC augmente le rapport H_2/H_1 du BAP témoin de 3.6, 12.2, 15.8 et 18.3 % respectivement (Figure 4.4).

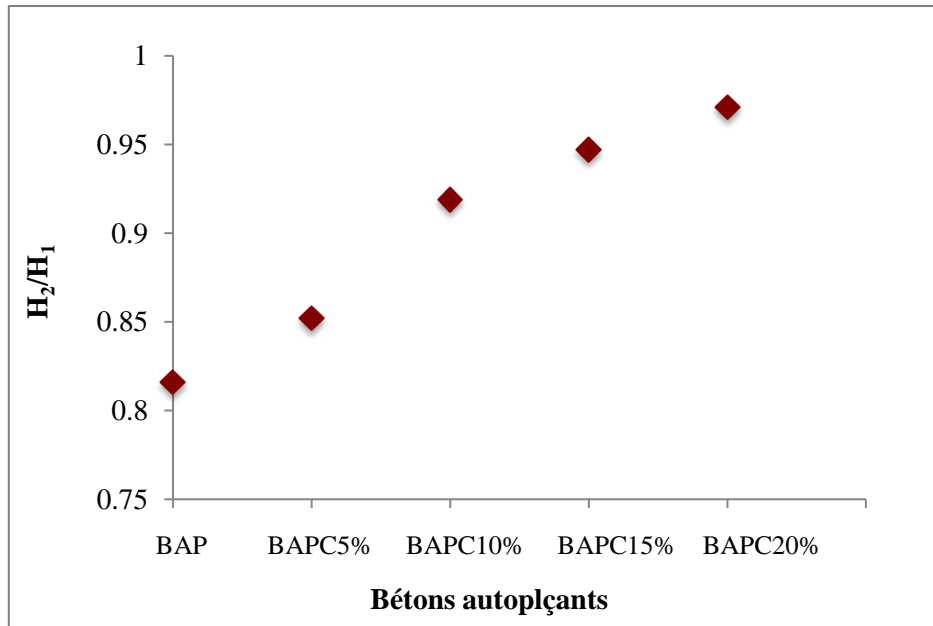


Figure 4.4. Rapport H_2/H_1 pour l'essai de la boîte en L des BAP et BAPCs.

4.2.2.3 Essai de stabilité au tamis

L'essai au tamis est utilisé pour caractériser la stabilité du béton, soit son caractère à résister à la ségrégation statique. De plus, par cet essai, on peut distinguer s'il y a un problème de ressuage primaire dans les 15 minutes après la gâchée.

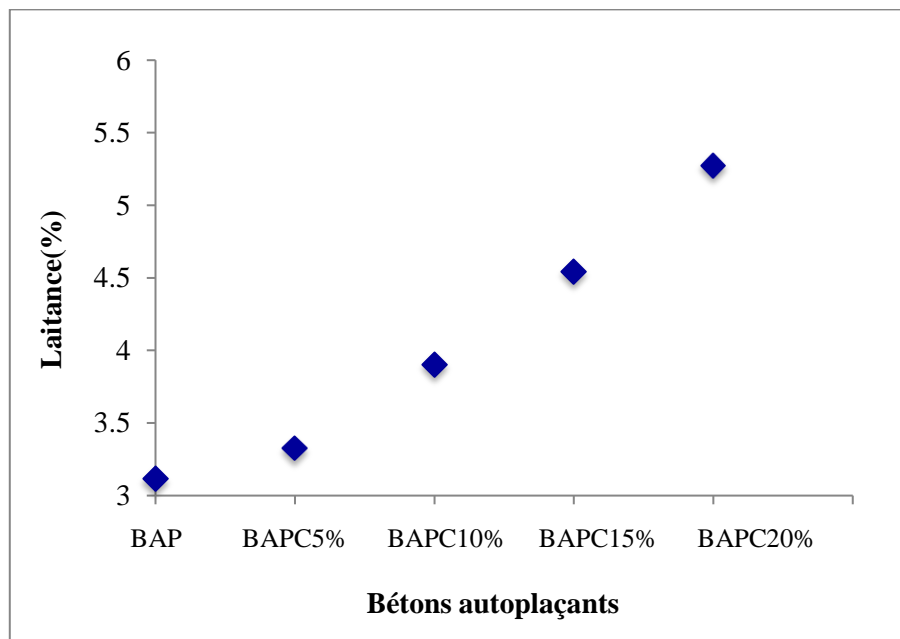


Figure 4.5. Stabilité au tamis des BAP et BAPCs.

Tous nos bétons ont présenté une bonne stabilité au tamis. En effet, la quantité de laitance est située dans le domaine des BAP, soit inférieure à 15 % validée pour le BAP et les BAPCs. Pour les bétons modifiés par les granulats de caoutchouc BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% ,on a un pourcentage de laitance supérieur à celui du BAP de 7.1, 25.4, 46 et 69.5 % respectivement.

4.2.2.4 La teneur en air & Masse volumique à l'état frais M_{Vf}

L'augmentation de la teneur en GC engendre une augmentation de la teneur en air et une diminution de la masse volumique M_{Vf} des BAP et BAPCs.

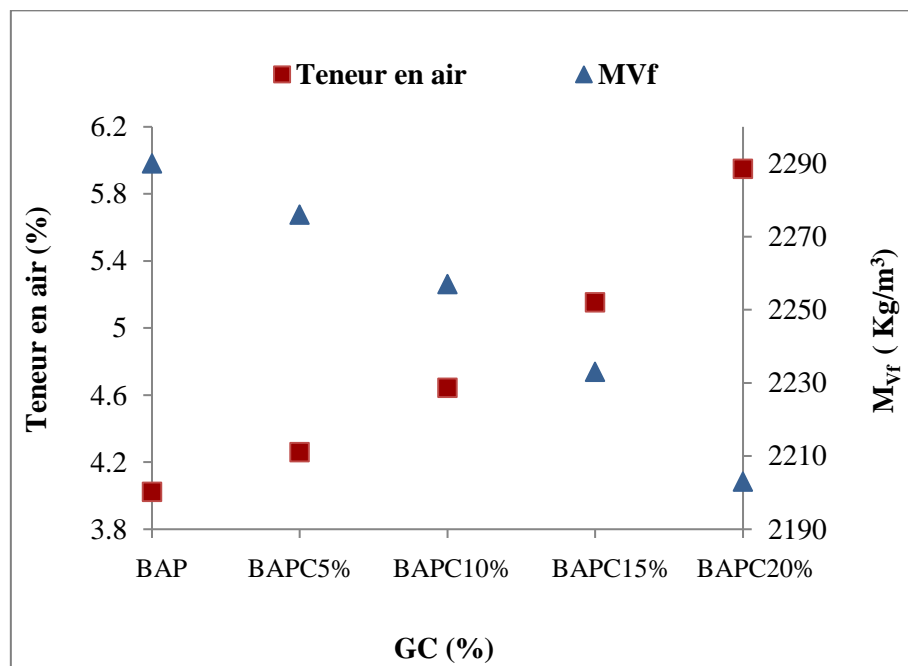


Figure 4.6. Teneur en air & Masse volumique à l'état frais M_{Vf} des BAP et BAPCs.

D'après les résultats obtenus, la substitution du sable par des granulats de caoutchouc, entraîne une augmentation de la teneur en air de 6, 15.4, 28.1 et 48% pour les BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% par rapport au BAP.

Cette substitution fait baisser très légèrement la masse volumique M_{Vf} avec une diminution maximale inférieure à 4% pour 20% des GC, due aux mêmes raisons citées dans le cas du béton ordinaire.

4.3 Caractérisation des bétons à l'état durci

4.3.1 Résistance à la compression

Les essais de compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques de 10 cm d'arrête. Ils ont été effectués pour les différents bétons aux âges de 28, 90 et 180 jours dans chaque milieu de conservation et ont fourni les résultats présentés sur les tableaux 4.3 et 4.6 et les figures 4.7, 4.11 et 4.12.

4.3.1.1 Influence du type et âge du béton (cure dans l'eau)

Pour le béton ordinaire, la substitution de 5, 10, 15 et 20% du sable par les granulats de caoutchouc provoque une chute de la résistance respectivement de 9, 19, 27.5 et 35.5% à 28 jours. Des valeurs similaires de diminution sont obtenues à 90 et 180 jours (Figure 4.7).

Plusieurs chercheurs confirment ces résultats [36, 37, 41, 169]. Cette perte est due à la nature des granulats du caoutchouc qui sont plus mous que la pâte de ciment environnante ce qui engendre l'apparition des fissures l'hors du chargement, et à l'augmentation de la teneur en vides qui entraîne certainement une réduction de la résistance [65].

La mauvaise adhérence entre le caoutchouc granulé et la pâte de ciment et la faible rigidité du caoutchouc entraînant une réduction de la rigidité de la masse de ces bétons sont aussi responsables de cette de la résistance à la compression. La formation des fissures au niveau de la région interfaciale entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment provoque donc la chute de cette résistance [170].

Tableau 4.3. Résistance à la compression des différents bétons (cure dans l'eau).

R_c (MPa)					
Eau					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
28 jours	40,16 <i>± 0,34</i>	36,58 <i>± 0,26</i>	32,59 <i>± 0,46</i>	29,09 <i>± 0,19</i>	25,87 <i>± 0,31</i>
90 jours	47,05 <i>± 0,27</i>	43,07 <i>± 0,47</i>	37,78 <i>± 0,56</i>	33,90 <i>± 0,53</i>	30,41 <i>± 0,71</i>
180 jours	52,73 <i>± 0,80</i>	47,53 <i>± 0,52</i>	42,85 <i>± 0,35</i>	38,51 <i>± 0,87</i>	34,12 <i>± 0,40</i>
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
28 jours	39,06 <i>± 0,34</i>	34,54 <i>± 0,35</i>	29,55 <i>± 0,40</i>	26,06 <i>± 0,19</i>	23,15 <i>± 0,21</i>
90 jours	45,24 <i>± 0,24</i>	40,20 <i>± 0,46</i>	35,01 <i>± 0,54</i>	31,13 <i>± 1,09</i>	27,46 <i>± 0,45</i>
180 jours	50,03 <i>± 0,67</i>	45,02 <i>± 0,37</i>	40,09 <i>± 0,76</i>	35,52 <i>± 0,52</i>	31,54 <i>± 0,24</i>

Les BAPCs subissent aussi les mêmes remarques de diminution de la résistance à la compression que les BOCs avec des taux de perte plus importants. A 28 jours, cette résistance diminue de 11.5, 24, 33 et 41% par rapport au BAP pour les BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% respectivement. Des valeurs presque similaires de diminution sont obtenues pour les résistances à 90 et 180 jours. Différentes recherches sur le béton autoplaçant concluent que les granulats de caoutchouc sont préjudiciables pour la résistance à la compression [57, 62, 66, 171], pour les mêmes raisons évoquées pour les bétons ordinaires.

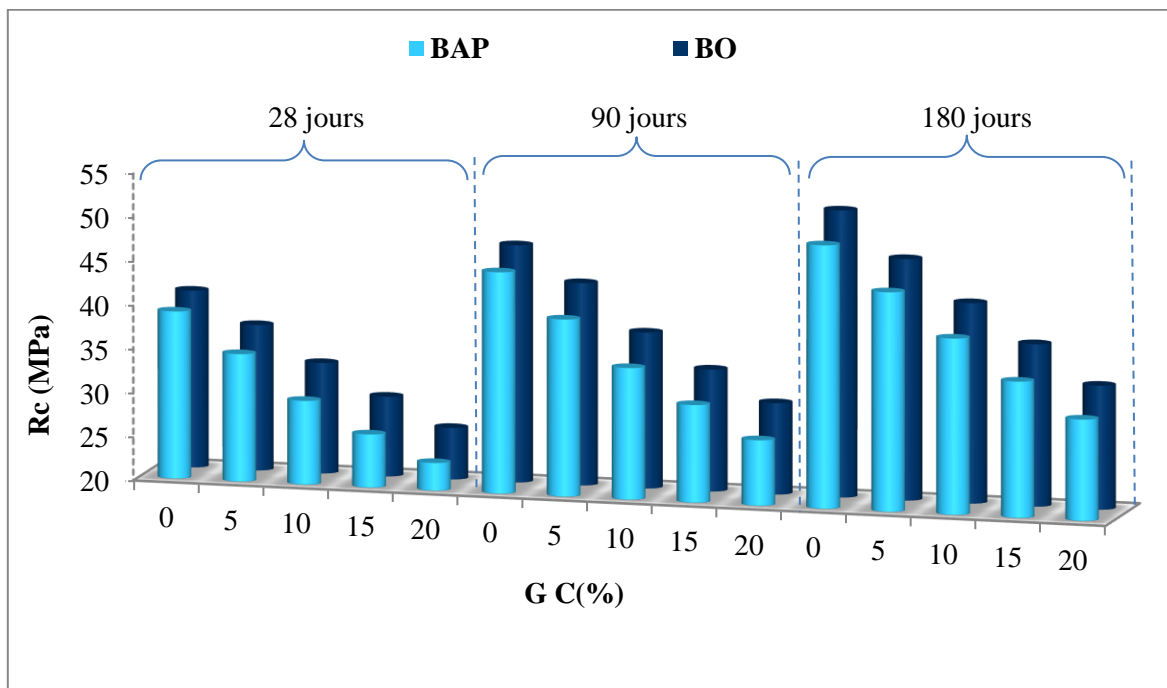


Figure 4.7. Résistance à la compression des différents types de béton à 28, 90 et 180 jours (Cure dans l'eau)

A 28 jours, les résistances à la compression du BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% sont supérieures de 2.7, 5.6, 9.3, 10.4 et 10.5 % par rapport à celles des BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% respectivement. Quant aux chutes des résistances, elles sont plus importantes dans le cas des BAP.

Le développement de la résistance à la compression en fonction de l'âge est illustré dans les figures 4.7. D'après ces figures, on constate que la résistance à la compression de tous les types de bétons évoluent avec le temps à cause du durcissement du ciment. Les résistances maximales à 28, 90 et 180 jours ont atteint respectivement 40.16, 47.05 et 52.73 MPa pour le béton ordinaire témoin BO.

4.3.2 Résistance à la flexion

Après une période de maturation de 28 jours en immersion dans l'eau, les essais de flexion ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques (7 x7 x 28) cm³ et ont fourni les résultats présentés dans le tableau 4.4 et la figure 4.8.

Tableau 4.4. Résistance à la flexion des différents bétons.

Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
R_{f28} (MPa)	7,81 ± 0,077	7,08 ± 0,108	6,28 ± 0,078	5,61 ± 0,097	5,03 ± 0,103
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
R_{f28} (MPa)	7,72 ± 0,082	6,89 ± 0,094	6,10 ± 0,090	5,53 ± 0,148	4,91 ± 0,073

On note l'obtention des résistances de flexion très proches des différents bétons appartenant aux deux groupes (BOs et BAPs).

La résistance à la flexion diminue progressivement en incorporant les granulates de caoutchouc dans le béton ordinaire. Cette diminution est respectivement de 9.3, 19.6, 28.2 et 35.6% pour les BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% par rapport au BO. Cette remarque est similaire pour le groupe des BAP, où les mêmes substitutions du sable ont provoqué des chutes de cette résistance de 10.7, 21, 28.3 et 36.4% respectivement des BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%.

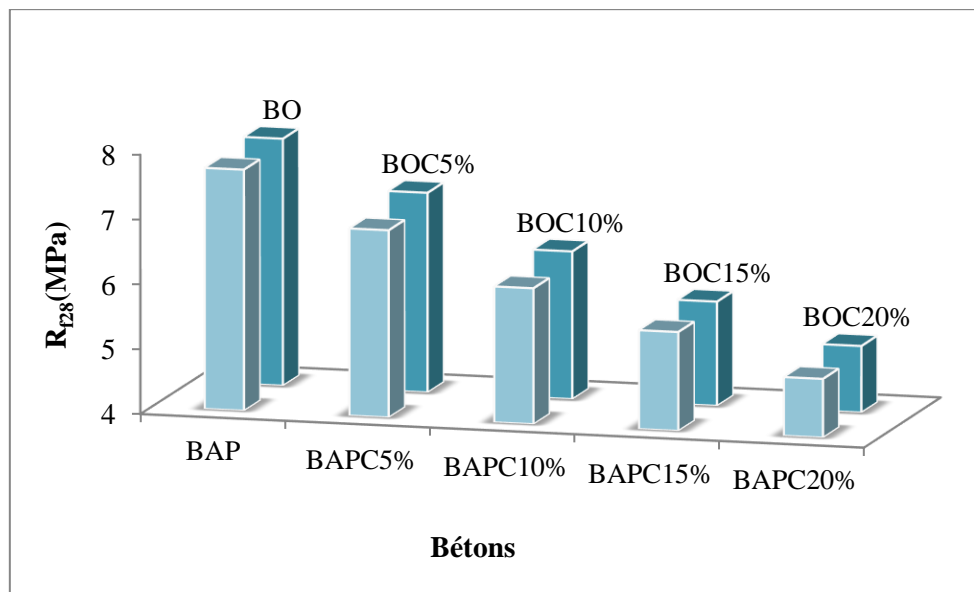


Figure 4.8. Résistance à la flexion des différents types de béton à 28 jours.

Ces résultats de chute de résistance à flexion vont dans le sens des résultats de plusieurs études de recherche [35, 41, 54, 65, 72, 73, 80, 196]. Selon Ganjian et al. ces pertes résultant de l'incorporation des particules de caoutchouc sont liées à la faible adhérence entre les particules de caoutchouc et la pâte de ciment [73].

4.3.3 Porosité accessible à l'eau et masse volumique apparente

Les résultats des essais expérimentaux réalisés sur des éprouvettes (10 x 10 x 10) cm³ selon la procédure exposée en section 5.4 du chapitre 3 sont présentés dans le tableau 4.5 ainsi que par les figures 4.9 et 4.10. Ces résultats indiquent une augmentation de la porosité et une diminution de la masse volumique apparente des BOCs et BAPCs avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc en substitution volumique du sable naturel par rapport bétons témoins (BO et BAP).

Tableau 4.5. Porosité et masse volumique apparente des différents bétons.

Bétons	BO	BOC 5%	BOC 10%	BOC 15%	BOC 20%
P(%)	13,05 ± 0,13	13,46 ± 0,128	13,84 ± 0,159	14,24 ± 0,19	14,68 ± 0,177
M _v (Kg/m ³)	2303 ± 8,25	2284 ± 6,97	2263 ± 8,13	2236 ± 11,00	2212 ± 8,04
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
P(%)	13,10 ± 0,18	13,52 ± 0,12	13,96 ± 0,24	14,38 ± 0,26	14,84 ± 0,12
M _v (Kg/m ³)	2289 ± 4,97	2261 ± 12,55	2229 ± 5,43	2197 ± 7,90	2162 ± 5,45

Une porosité maximale de 14.68% est obtenue pour le mélange BOC20% et de 14.84% pour le mélange BAPC20%. La substitution de 5, 10, 15 et 20% de ces particules augmente la porosité des BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% de 3.1, 6, 9.1 et 12.5% respectivement, et celle des BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% de 3.2, 6.5, 9.8 et 13.3 %.

Des résultats similaires ont été rapportés par d'autres études menées sur les bétons caoutchoutés [35, 169, 171, 172]. Selon Fedroff et al. cette augmentation est due à la nature non polaire des particules de caoutchouc et à leur capacité à emprisonner l'air dans leur texture de surface dentelée [72].

Les valeurs de porosité des BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% sont très légèrement inférieures à celles des BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%. Ces augmentations de la porosité reflètent fidèlement les chutes constatées des résistances. L'augmentation de la porosité évolue proportionnellement au volume de GC incorporés. Les augmentations de la porosité des BOC10%, BOC15% et BOC20% représentent respectivement 2, 3 et 4 fois celle du BOC5%. La même remarque concerne aussi les BAPCs. L'évolution de la masse volumique apparente pour les différents bétons est illustrée sur les mêmes figures de la porosité. Une diminution progressive de cette propriété des BOCs et BAPCs par rapport au BO et BAP par l'augmentation de la teneur en caoutchouc.

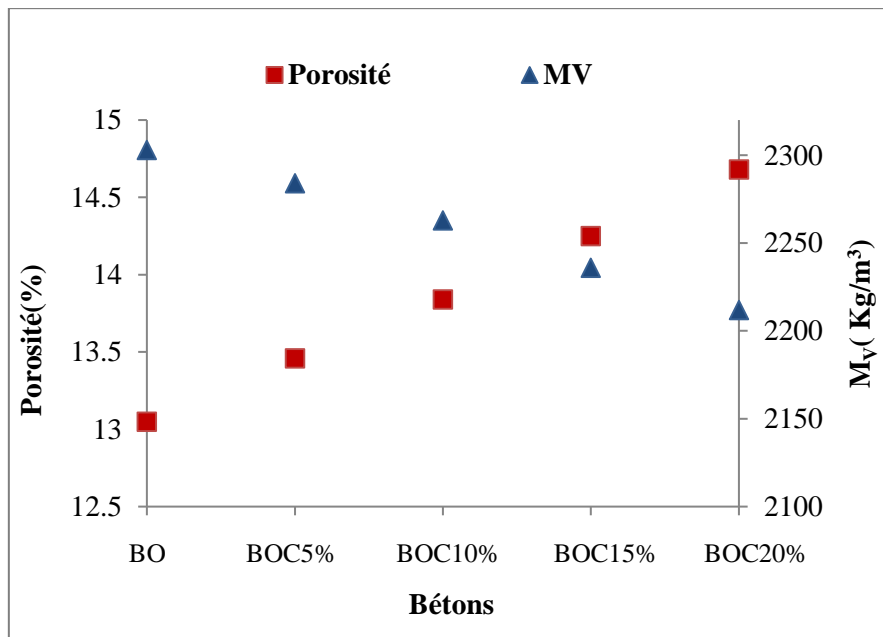


Figure 4.9. Porosité et masse volumique apparente des BO et BOCs à 28 jours.

La masse volumique apparente de 2.30 g/cm^3 du béton ordinaire BO diminue à 2.21 g/cm^3 avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc de 0 à 20%, ce qui représente moins de 4%. La chute maximale atteint 5.5% pour le BAPC20%.

La majorité des recherches confirment la perte de la masse volumique des bétons caoutchoutés en raison de la faible densité du caoutchouc, et à l'augmentation de la teneur en air qui réduit leurs masses [72, 78, 82, 169].

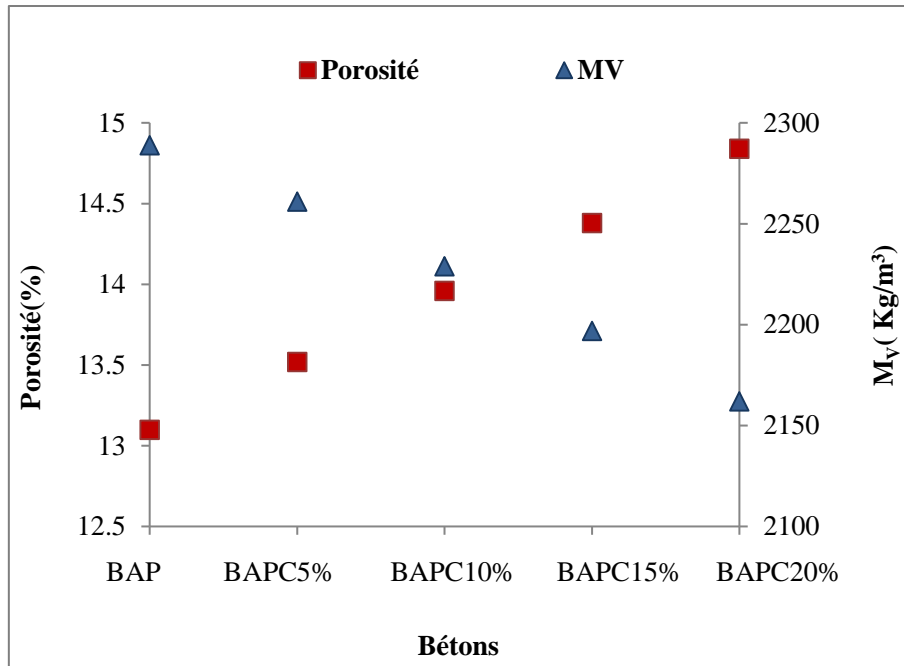


Figure 4.10. Porosité et masse volumique apparente des BAP et BAPCs à 28 jours.

Les masses volumiques des BAP et BAPCs sont légèrement inférieures à celles des BO et BOCs. Elles varient de 2.29 à 2.16 g/cm³ pour une teneur de GC de 0 à 20%. Cette diminution est due à la composition différente des BAP par rapport au BO (quantité moins de graviers) et aussi aux valeurs de porosité des BAP et BAPCs qui sont plus grandes que celle des BO et BOCs. On remarque que les bétons les plus poreux sont les plus légers.

4.3.4 Durabilité (Attaques du Na₂SO₄ et de l'eau de mer)

Après 28 jours de cure dans l'eau, les éprouvettes ont été conservées dans deux milieux différents (une solution de Na₂SO₄ et l'eau de mer), en plus d'une conservation dans l'eau indiquée précédemment, pour une durée de 90 et 180 jours. L'effet de ces attaques a été quantifié à travers les résistances à la compression qui sont indiquées dans le tableau 4.6.

Il est à noter que selon l'inspection visuelle, aucun signe d'endommagement n'a été détecté (fissuration ou détérioration des éprouvettes) durant toute la durée de cure. Une couleur blanche a couvert les éprouvettes conservées dans Na₂SO₄ et une couche de sel celles des éprouvettes immergées dans l'eau de mer (Figure 4.11).

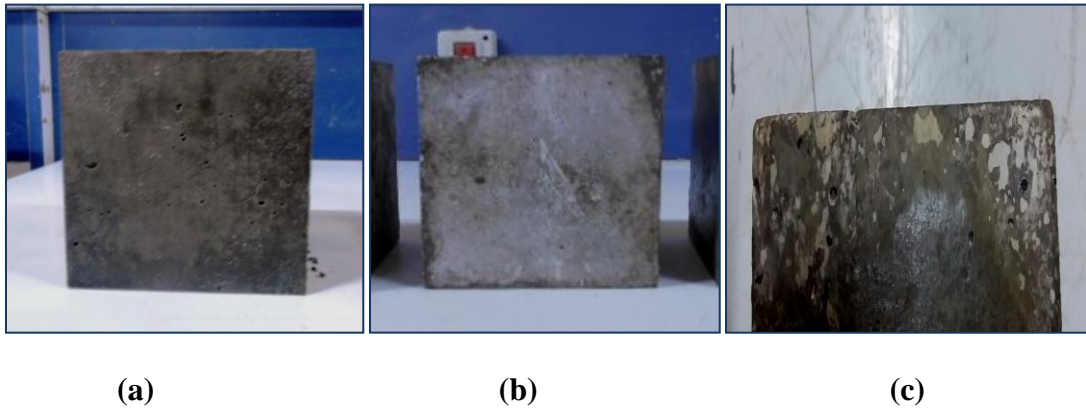


Figure 4.11. L'apparence des éprouvettes selon le milieu de conservation
 (a) Eau de robinet, (b) Na_2SO_4 , (c) Eau de mer

Tableau 4.6. Résistance à la compression des différents bétons dans des milieux agressifs.

R_c (MPa)					
Na₂SO₄					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
90 jours	38,46 <i>± 0,53</i>	35,05 <i>± 0,22</i>	31,35 <i>± 0,48</i>	28,12 <i>± 0,40</i>	25,17 <i>± 0,27</i>
180 jours	34,81 <i>± 0,25</i>	31,89 <i>± 0,54</i>	28,95 <i>± 0,100</i>	26,32 <i>± 0,56</i>	23,87 <i>± 0,18</i>
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
90 jours	37,17 <i>± 0,40</i>	32,92 <i>± 0,17</i>	28,30 <i>± 0,44</i>	25,09 <i>± 0,37</i>	22,47 <i>± 0,44</i>
180 jours	33,58 <i>± 0,61</i>	29,92 <i>± 0,25</i>	26,09 <i>± 0,69</i>	23,45 <i>± 0,47</i>	21,27 <i>± 0,16</i>
Eau de mer					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
90 jours	39,09 <i>± 0,51</i>	35,62 <i>± 0,49</i>	31,79 <i>± 0,43</i>	28,49 <i>± 0,39</i>	25,45 <i>± 0,23</i>
180 jours	37,34 <i>± 0,40</i>	34,05 <i>± 0,30</i>	30,44 <i>± 0,33</i>	27,35 <i>± 0,47</i>	24,56 <i>± 0,27</i>
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
90 jours	37,80 <i>± 0,34</i>	33,47 <i>± 0,29</i>	28,70 <i>± 0,27</i>	25,43 <i>± 0,28</i>	22,72 <i>± 0,20</i>
180 jours	36,04 <i>± 0,18</i>	31,97 <i>± 0,37</i>	27,46 <i>± 0,31</i>	24,41 <i>± 0,46</i>	21,91 <i>± 0,13</i>

a) L'attaque du Na_2SO_4

L'influence du milieu sulfatique sur la résistance à la compression des différents bétons est illustrée sur la figure 4.12.

Une chute de la résistance à la compression dans le temps (90 et 180 jours) est observée des éprouvettes immergées dans 5% de Na_2SO_4 , par rapport à celle des bétons conservés dans l'eau qui elle par contre augmente avec le temps.

En prenant comme référence la résistance à la compression à 28 jours de conservation dans l'eau, qui est la résistance caractéristique de point de vue nominatif, la chute pour les bétons ordinaires BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% est respectivement de 4.2, 4.2, 3.5, 3.3 et 2.7% à 90 jours. Tandis qu'à 180 jours, elle est de 13.32, 12.82, 11.17, 9.52 et 7.73%.

Quant au BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%, cette chute de résistance est respectivement de 4.8, 4.7, 4.2, 3.7 et 2.9% à 90 jours et à 180 jours elle est de 14.03, 13.37, 11.71, 10.02 et 8.12%.

On observe que les chutes des BO sont légèrement inférieures à celles des BAP. L'autre constat est que plus le volume de substitution par des GC augmente et plus la chute diminue pour les deux types de béton (BO et BAP). Des recherches impliquent le rôle bénéfique des GC vis à vis de l'attaque par Na_2SO_4 au fait que le caoutchouc est un matériau élastique et il peut absorber l'énergie d'expansion provoquée par l'ettringite, évitant ainsi l'apparition des fissures dues à cette attaque [173].

Néanmoins cette comparaison à la résistance caractéristique reste non précise. Car elle ne prend pas en considération l'augmentation de la résistance avec l'âge des bétons même conservés dans des milieux agressifs. Donc, il est plus juste de procéder à une comparaison avec des conservations pendant les mêmes durées.

Xu et al. ont même obtenu des augmentations de la résistance à 30 et 60 jours de conservation dans une solution sulfatée d'un béton contenant 10% de poudrette de caoutchouc. Ces augmentations étaient respectivement de 11% et 5% par rapport à la résistance à 28 jours de conservation dans l'eau [173]. Donc, dans ce cas précis le gain de résistance par le durcissement était supérieur à la chute provoquée par l'attaque.

Comparativement à une conservation dans l'eau pendant la même durée, la perte pour nos bétons BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% est respectivement de 18.2, 18.6, 17, 17 et 17.2 % à 90 jours, et de 34, 32.2, 32.4, 31.6 et 30% à 180 jours respectivement.

Pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%, on note une diminution de 17.8, 18.1, 19.1, 19.4, 18.2% à 90 jours et 32.9, 33.5, 34.9, 34 et 32.6% à 180 jours.

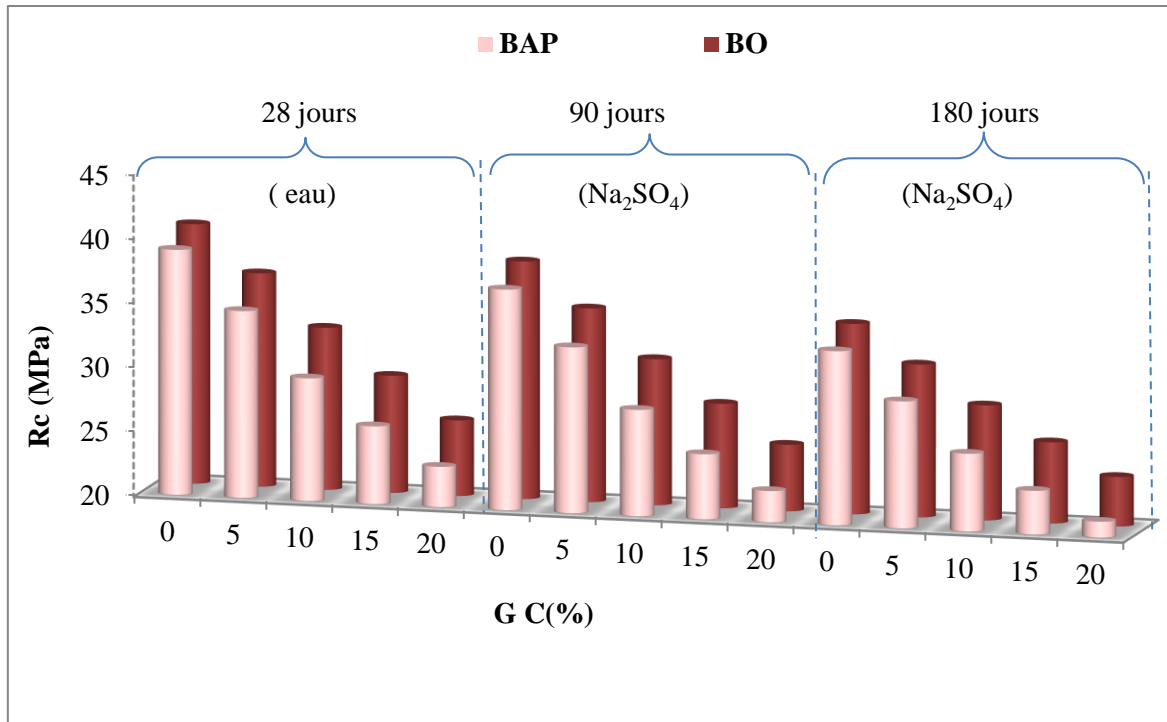


Figure 4.12. Résistance à la compression des différents types de béton après immersion dans une solution de Na_2SO_4 .

Le taux de perte des résistances en compression des BAP est légèrement supérieur à celui des BO. Cela peut s'expliquer par la porosité élevée du groupe des bétons BAP par rapport au celui des BO. On a une perte moyenne à 90 jours de 17.5% pour les BO contre 18.5% pour les BAP. Tandis qu'à 180 jours, cette perte moyenne est de 32% pour les BO contre 33.6% pour les BAP. La durée de l'attaque provoque une augmentation de cette chute de résistance, cette dernière a presque doublé entre 90 et 180 jours.

b) L'attaque par l'eau de mer

La figure 4.13 présente l'influence de l'eau de mer sur la résistance à la compression des différents bétons dans le temps. Comme l'effet de l'attaque sulfatique sur la résistance à la compression des bétons dans la partie précédente, tous les types de bétons subissent une chute de cette propriété lors de leurs conservations dans l'eau de mer.

La chute des résistances, comparativement à la compression à 28 jours de conservation dans l'eau, pour les bétons ordinaires BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% est respectivement de 2.7, 2.6, 2.5, 2.1, et 1.6% à 90 jours. Tandis qu'à 180 jours, elle est de 7, 6.9, 6.6, 6 et 5.1%.

Les bétons BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%, présentent des chutes de résistance respectivement de 3.2, 3.1, 2.9, 2.4 et 1.8% à 90 jours et à 180 jours elles sont de 7.7, 7.4, 7.1, 6.3 et 5.3%.

Les mêmes remarques faites pour la première attaque restent de mises pour la conservation dans l'eau de mer. Mais les chutes sont inférieures à celles de l'attaque par Na_2SO_4 , pouvant atteindre les 50% de différence.

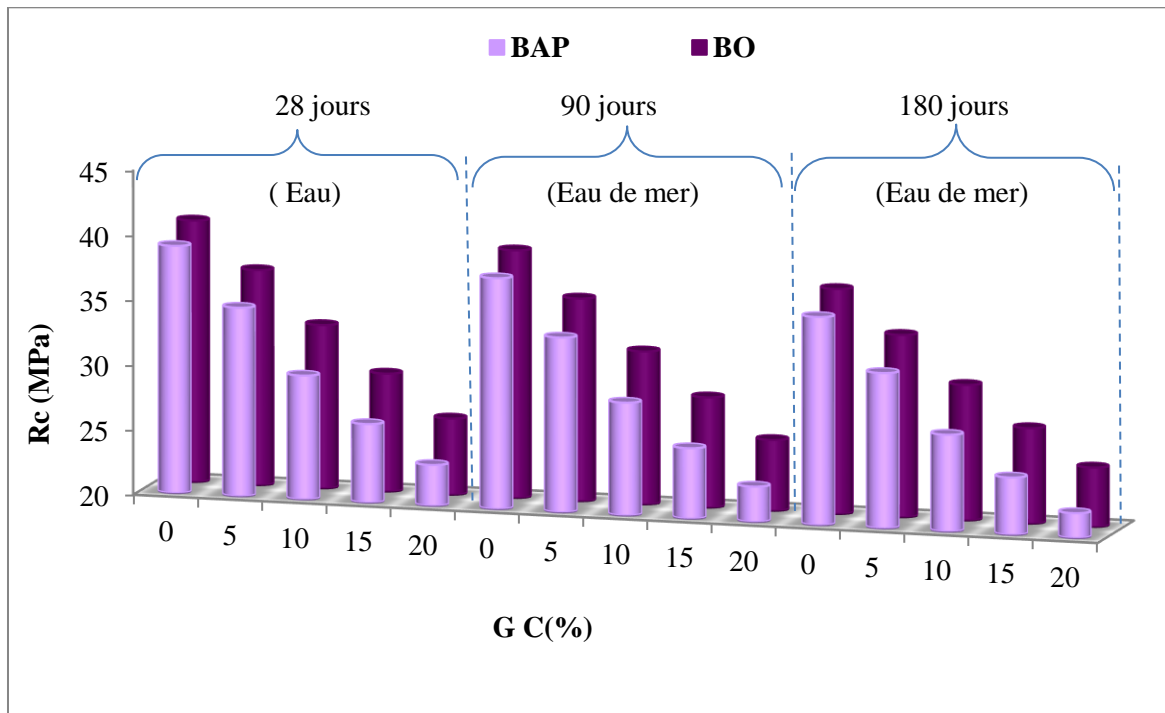


Figure 4.13. Résistance à la compression des différents types de béton après immersion dans l'eau de mer.

La comparaison pour les mêmes durées de conservation fait évoluer les chutes des résistances. A 90 jours de conservation, les bétons ordinaires avec des substitutions de 0, 5, 10, 15 et 20% ont subi des chutes de résistances respectivement de 16.9, 17.3, 15.8, 15.9 et 16.3%. Tandis qu'à 180 jours, ces chutes sont de 29.2, 28.4, 28.9, 29 et 28%.

Pour les BAP, ces chutes pour les deux durées de conservations 90 et 180 jours sont respectivement de 16.4, 16.7, 18, 18.3, 17.3% et 28, 29, 31.5, 31.3, 30.5%. On a une chute moyenne de 16.4% pour les BO et 17.2% pour les BAP à 90 jours. A 180 jours, cette chute progresse à 28.7% pour les BO et à 30% pour les BAP.

Les mêmes remarques avancées pour la conservation dans une solution de Na_2SO_4 restent de mise dans la conservation dans l'eau de mer. Le taux de perte des résistances en compression

des BAP est légèrement supérieur à celui des BO. Et que la durée de l'attaque provoque une augmentation de cette chute de résistances.

4.4 Conclusion

Les compositions du béton ordinaire et du béton autoplaçant ont été modifiées par la substitution d'une partie du sable par des granulats de caoutchouc issus du broyage des pneus usagés. Cette modification a impacté les propriétés de ces bétons aussi bien à l'état sain qu'endommagé. Les résultats des essais expérimentaux obtenus nous permettent de faire les conclusions suivantes :

- L'effet des granulats de caoutchouc se reflète par une augmentation maximale de l'affaissement de plus de 50% et 33% pour la teneur en air pour les BOC. Quant à la masse volumique, sa chute est relativement faible avec moins de 4% par rapport au BO sans caoutchouc.
- Les BAP présentent des augmentations de l'ouvrabilité moins importantes que celles des BO causée par l'incorporation des granulats de caoutchouc. On a une augmentation maximale de 17% pour l'étalement et 18 % pour la boîte en L. La stabilité au tamis et la teneur en air sont par contre plus influencées par la présence des granulats de caoutchouc. Des augmentations maximales de 69.5 % et 48 % sont respectivement observées pour la stabilité au tamis et pour la teneur en air. La chute de la masse volumique est du même ordre que celle des BO avec moins de 4%.
- Les granulats de caoutchouc incorporés dans le BO et le BAP sont préjudiciables pour la résistance à la compression. Cette chute semble indifférente à l'âge du béton. Les BAP présentent des chutes légèrement plus importantes que les BO. On a des chutes maximales de 41% pour les BAP contre moins de 36% pour les BO pour la résistance à la compression.
- Comme pour la compression, la résistance à la flexion est influencée négativement par l'incorporation des granulats de caoutchouc en substitution au sable. Les chutes maximales de la résistance en flexion sont du même ordre que celles en compression. Les deux types de béton présentent des chutes maximales similaires au alentour de 36%.
- Le béton ordinaire BO donne la plus petite valeur de porosité et la plus grandes masse volumique par rapport au BAP. Une augmentation de la porosité et une diminution de la masse volumique apparente des BOCs et BAPCs sont obtenues avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc en substitution volumique du sable naturel par rapport au

BO et BAP. Les valeurs de porosité des BO, des BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% sont très légèrement inférieures à celles des BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%. Ces augmentations de la porosité reflètent fidèlement les chutes constatées des résistances. L'augmentation de la porosité évolue proportionnellement au volume de GC incorporés. Elles représentent respectivement 2, 3 et 4 fois celle du BOC5% pour les BOC10%, BOC15% et BOC20%. La même remarque concerne aussi les BAPCs.

- La masse volumique apparente de 2.30 g/cm^3 du béton ordinaire BO diminue à 2.21 g/cm^3 avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc de 0 à 20%, ce qui représente moins de 4%. La chute maximale atteint 5.5% pour le BAPC20%. Cette perte de la masse volumique des bétons caoutchoutés est due à la faible densité du caoutchouc, et à l'augmentation de la teneur en air.
- Le taux de perte des résistances en compression, provoqué par l'attaque Na_2SO_4 , des BAP est légèrement supérieur à celui des BO. Cela peut s'expliquer par la porosité élevée du groupe des bétons BAP par rapport à celui des BO. Les pertes de résistance, par rapport à la résistance à 28 jours de conservation dans l'eau, varient de 2.7 à 4.2 % pour les BO et de 2.9 à 4.8 % pour les BAP à 90 jours. A 180 jours, ces pertes varient respectivement de 7.7 à 13.3% et de 8.1 à 14%. Ces chutes de résistance évoluent inversement au volume des GC. Cependant, ce paramètre est beaucoup moins influençant quant on procède à une comparaison pendant la même durée de conservation. On a une perte moyenne à 90 jours de 17.5% pour les BO contre 18.5% pour les BAP. Tandis qu'à 180 jours, cette perte moyenne est 32% pour les BO contre 33.6% pour les BAP.
- Les pertes de résistance due à l'attaque par l'eau de mer, par rapport à la résistance à 28 jours de conservation dans l'eau, varient de 1.6 à 2.7 % pour les BO et de 1.8 à 3.2 % pour les BAP à 90 jours. A 180 jours, ces pertes varient respectivement de 5.1 à 7% et de 5.3 à 7.7%. Si on considère les mêmes durées de conservation, on trouve que la conservation dans l'eau de mer par rapport à la conservation dans l'eau a provoquée une chute moyenne de 16.4% pour les BO et 17.2% pour les BAP à 90 jours. A 180 jours, cette chute progresse à 28.7% pour les BO et à 30% pour les BAP. Le taux de perte des résistances en compression des BAP est légèrement supérieur à celui des BO. La durée de l'attaque provoque une augmentation de cette chute de résistances.
- L'attaque par la solution Na_2SO_4 provoque des chutes plus importantes que celles par l'eau de mer pour les deux types de béton et pour les deux durées de conservation.

CHAPITRE 5

CARACTERISATION ET CORRELATIONS ULTRASONIQUES DES DIFFERENTS BETONS

5.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons l'analyse des différents résultats relatifs aux essais non destructifs par les ultrasons et les corrélations entre les vitesses ultrasoniques et les propriétés de différents bétons étudiés. L'agression chimique est aussi prospectée à travers les corrélations entre ces vitesses et les résistances des bétons agressés par deux milieux différents (Na_2SO_4 et l'eau de mer).

5.2 Vitesse de propagation des ondes ultrasoniques

La vitesse des impulsions ultrasoniques est une technique non destructive couramment utilisée pour les diagnostics des bétons et pour suivre l'évolution de ces propriétés dans le temps. Dans cette partie de l'étude nous avons étudié l'effet de quelques paramètres sur l'évolution de la vitesse ultrasonique, à savoir : le type de béton, l'âge de cure (28, 90 et 180 jours), diamètre et fréquence des transducteurs, et l'effet des milieux agressifs (Na_2SO_4 et l'eau de mer).

Les tableaux 5.1 à 5.3 et les figures 5.1 à 5.11 présentent l'effet de ces paramètres sur l'évolution des vitesses ultrasoniques.

Les essais ultrasoniques ont été effectués selon la procédure d'essais mentionnée dans la section 5.1 du chapitre 3 sur des éprouvettes cubiques de 10 cm d'arrête à un état d'hygrométrie saturée.

5.2.1 Influence du type de béton

Les figures 5.1 à 5.3 et le tableau 5.1 donnent l'évolution de la vitesse des ondes ultrasoniques pour les différents bétons (BO, BOCs, BAP et BAPCs) conservés dans l'eau pour les trois types transducteurs (A, B et C) à 28, 90 et 180 jours.

D'après ces résultats, on remarque que les valeurs les plus grandes obtenues pour la vitesse ultrasonique sont celles des bétons ordinaires (BO) à tous les âges et pour les trois transducteurs. Pour le transducteur A qui donne les plus grandes valeurs de vitesse par rapport aux deux autres, ces valeurs sont de 4776.25 m/s à 28 jours et atteignent 4990 m/s à 180 jours.

Concernant le BAP, les vitesses ultrasoniques obtenues sont proches de celles du BO mais restent légèrement inférieures de 1.22, 2.16 et 2.44 % pour les transducteurs "A" respectivement à 28, 90 et 180 jours. Le même constat est à faire pour les deux autres transducteurs. On a des différences de 0.85, 1.85 et 1.92 % pour les transducteurs B et 1.45, 1.27 et 0.62 % pour les transducteurs C à 28, 90 et 180 jours respectivement.

Tableau 5.1. Vitesses ultrasoniques des différents bétons - cure dans l'eau - .

UPV (m/s) (cure dans l'eau)					
Transducteurs A					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
28 jours	4776,25 ± 27,28	4699,66 ± 11,44	4655,33 ± 25,48	4546,00 ± 28,58	4426,25 ± 9,01
90 jours	4921,12 ± 17,21	4855,00 ± 12,02	4800,66 ± 16,33	4684,50 ± 15,68	4567,62 ± 14,74
180 jours	4990,00 ± 12,88	4908,16 ± 8,16	4855,50 ± 9,89	4734,66 ± 9,22	4615,37 ± 8,87
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
28 jours	4717,88 ± 12,24	4669,83 ± 6,94	4580,17 ± 7,14	4493,75 ± 11,86	4406,67 ± 9,97
90 jours	4814,88 ± 10,79	4765,17 ± 4,47	4669,17 ± 7,55	4578,13 ± 14,35	4480,67 ± 17,49
180 jours	4868,25 ± 9,75	4833,17 ± 8,24	4730,50 ± 4,24	4633,00 ± 14,23	4524,67 ± 6,14
Transducteurs B					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
28 jours	4628,62 ± 13,37	4554,00 ± 7,35	4486,33 ± 12,28	4372,00 ± 13,06	4248,12 ± 9,50
90 jours	4757,37 ± 14,45	4696,66 ± 12,96	4627,00 ± 8,48	4506,83 ± 13,88	4382,25 ± 18,63
180 jours	4805,12 ± 21,30	4746,16 ± 4,47	4687,83 ± 12,96	4562,66 ± 7,14	4443,12 ± 16,74
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
28 jours	4589,13 ± 16,43	4543,33 ± 7,91	4436,67 ± 12,25	4334,50 ± 11,92	4237,67 ± 6,95
90 jours	4669,38 ± 11,22	4624,17 ± 7,14	4516,67 ± 4,00	4414,00 ± 8,71	4306,50 ± 9,75
180 jours	4712,75 ± 11,82	4678,83 ± 7,55	4580,17 ± 12,25	4477,00 ± 12,78	4364,00 ± 11,31
Transducteurs C					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
28 jours	2500,37 ± 17,04	2471,50 ± 7,07	2440,66 ± 11,24	2405,83 ± 6,24	2372,00 ± 5,84
90 jours	2558,25 ± 8,31	2532,66 ± 5,18	2502,83 ± 10,84	2470,83 ± 10,49	2433,37 ± 3,69
180 jours	2580,87 ± 3,47	2560,50 ± 3,34	2532,66 ± 6,48	2500,16 ± 7,41	2464,12 ± 9,22
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
28 jours	2464,13 ± 7,90	2450,17 ± 10,53	2423,00 ± 2,16	2400,88 ± 7,09	2366,50 ± 4,02
90 jours	2525,88 ± 6,57	2511,17 ± 6,12	2482,67 ± 3,29	2454,00 ± 5,30	2426,50 ± 6,12
180 jours	2565,00 ± 6,60	2547,00 ± 7,78	2509,33 ± 6,12	2484,38 ± 3,26	2453,17 ± 5,10

Puisque la vitesse ultrasonique est directement affectée par le volume des vides dans le béton, cette réduction est due à la porosité des BAP qui est légèrement supérieure à celle du BO. Cette différence reste négligeable car les vitesses ultrasoniques se rapportent plus à la densité du matériau.

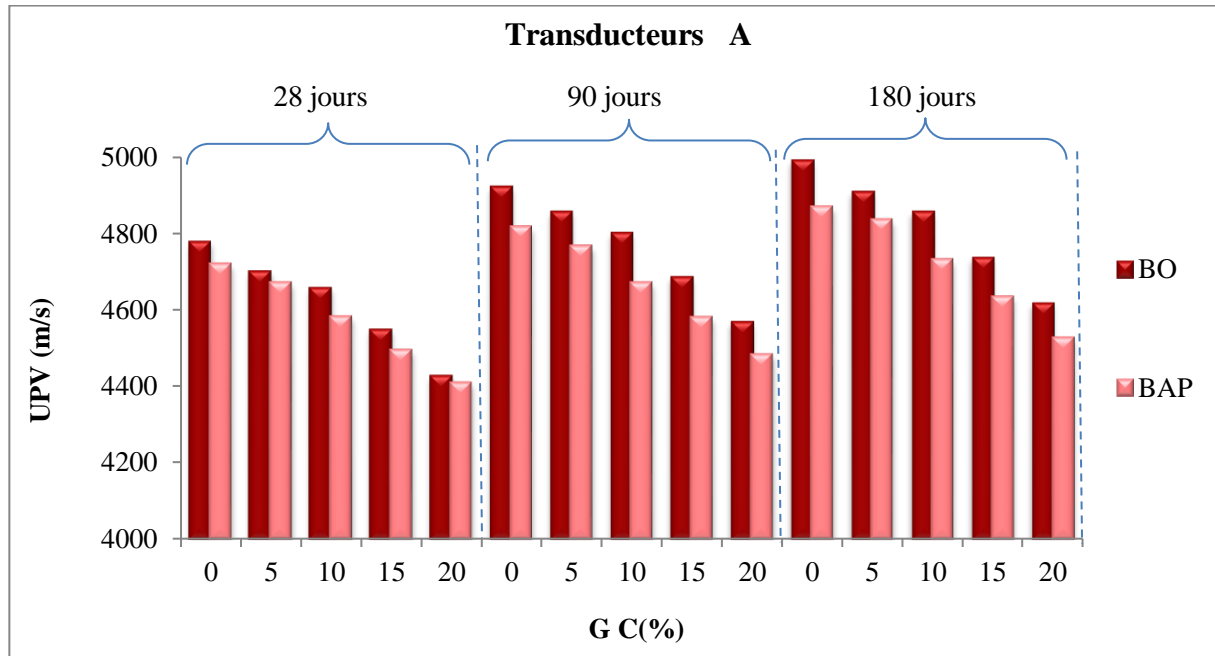


Figure 5.1. Evolution des vitesses ultrasoniques des différents bétons – transducteurs A-.

La substitution du sable par des particules de caoutchouc dans le BO et aussi dans le BAP a conduit à une diminution des vitesses ultrasoniques pour tous les transducteurs et tous les âges. Cette diminution augmente en fonction de la teneur de GC. Ces résultats confirment les travaux d'Albano et coll. [103], Boudjedra et al. [169] et Rao et Mujeeb [174] qui ont observé une diminution de la vitesse ultrasonique dans le béton en raison de l'incorporation des particules de caoutchouc. Cette baisse est due à l'augmentation de la porosité et à la teneur plus élevée en vides d'air en raison des surfaces rugueuses des particules de caoutchouc. Sans oublier la densité des granulats de caoutchouc qui est très inférieures à celles des autres constituants de ces bétons. A 28 jours, la substitution de 5, 10, 15 et 20% du sable par les granulats de caoutchouc dans le BO a conduit à une diminution des vitesses ultrasoniques par rapport au béton témoin de 1.60, 2.53, 4.82 et 7.33 % pour les transducteurs A, de 1.61, 3.07, 5.54 et 8.22% pour les transducteurs B et de 1.15, 2.39, 3.78 et 5.13 % pour les transducteurs C, respectivement. Cette chute est presque la même à 90 et 180 jours pour les trois transducteurs. La même remarque concerne les BAPCs avec des valeurs de perte des vitesses ultrasoniques par rapport aux BAP semblables à celles des BOCs.

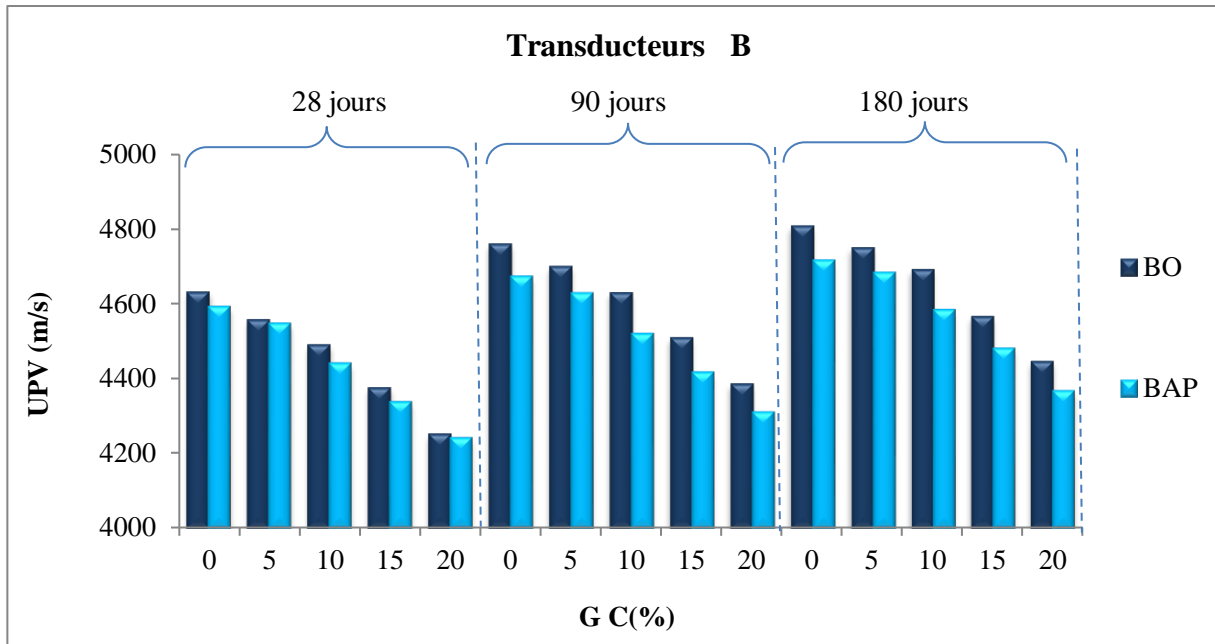


Figure 5.2. Evolution des vitesses ultrasoniques des différents bétons – transducteurs B-.

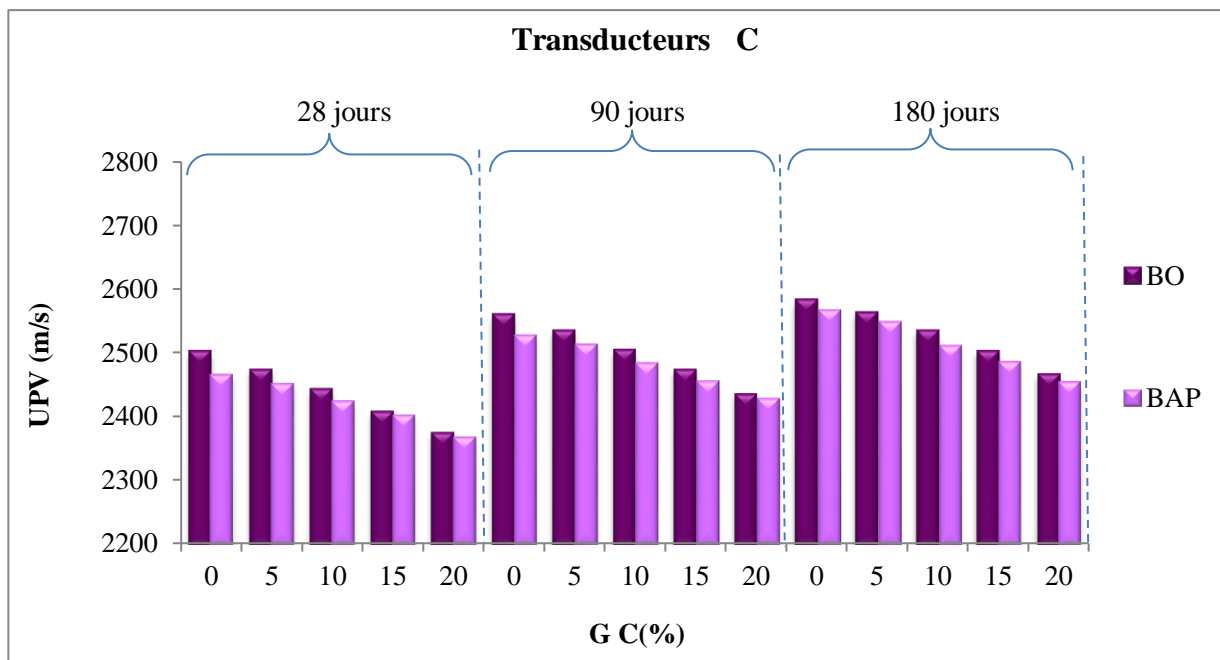


Figure 5.3. Evolution des vitesses ultrasoniques des différents bétons – transducteurs C-.

5.2.2 Influence de l'âge des bétons

Comme prévu, les résultats montrent que les vitesses ultrasoniques augmentent avec l'augmentation du temps de durcissement. Des chercheurs [102, 103, 105] ont indiqué que cette croissance peut être expliquée par la réaction chimique entre l'eau et le ciment au fil du temps conduisant au durcissement. Plus le temps de durcissement est long, plus l'hydratation de la

pâte est grande. Il en résulte un volume de pores plus faible qui donne une lecture plus élevée des vitesses.

Pour le BO et BOCs, une augmentation d'environ 4% de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores entre 28 et 180 jours a été observée pour les trois transducteurs.

Tandis qu'entre 90 et 180 jours cette augmentation n'est que d'environ 1%. Une observation similaire a été rapportée par Albano et al. [103] et Abo-Qudais [105], où ils ont indiqué que l'augmentation de la vitesse ultrasonique était rapide dans les premiers jours de durcissement et s'est ensuite poursuivie à un rythme plus lent. Ceci reflète la cinétique du durcissement du béton et l'évolution de sa résistance dans le temps.

Les mêmes remarques pour l'effet de l'âge sur les vitesses ultrasoniques sont observées dans le cas des BAP et BAPCs avec des taux d'augmentation légèrement inférieurs à ceux des BO et BOCs.

D'après ces résultats, on peut conclure aussi que l'âge du béton n'affecte pas la diminution de des vitesses ultrasoniques causée par l'incorporation de particules de caoutchouc, soit dans le cas des BOCs ou bien celui des BAPCs.

5.2.3 Influence des fréquences et diamètres des transducteurs

L'influence du type de transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques est illustrée sur les figures 5.4 et 5.5.

Nous avons utilisé dans cette étude trois types de transducteurs qui se différencient par le diamètre et la fréquence (Tableau 3.6 et Figure 3.7). La fréquence et le diamètre des transducteurs influencent la vitesse de transmission des ultrasons comme indiqué dans plusieurs études [127, 128, 169]. Selon ces études l'augmentation de la fréquence et du diamètre des transducteurs donne une faible divergence du faisceau ultrasonore, d'où une meilleure précision et une moindre perturbation des mesures des vitesses par ces transducteurs.

Les transducteurs A, avec le plus grand diamètre et la fréquence la plus élevée, donnent les vitesses les plus élevées pour tous les bétons (BO, BOCs, BAP et BAPCs) et à tous les âges (28, 90 et 180 jours). Cette vitesse a atteint 4990 m/s pour le BO à 180 jours.

Tandis que les transducteurs C avec le petit diamètre et la grande fréquence ont connu une grande chute de ces vitesses. La plus grande vitesse obtenue par ces transducteurs (C) est de 2580.87 m/s toujours pour le BO à 180 jours.

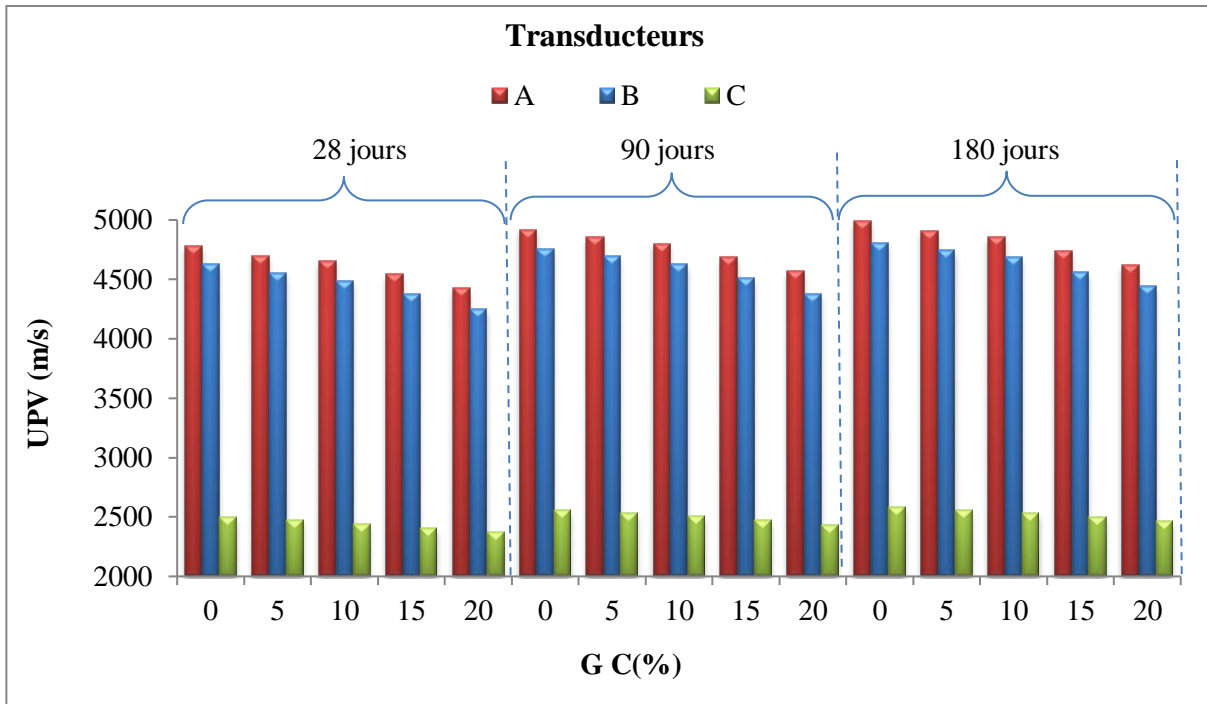


Figure 5.4. Effet du type des transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques (BO et BOCs).

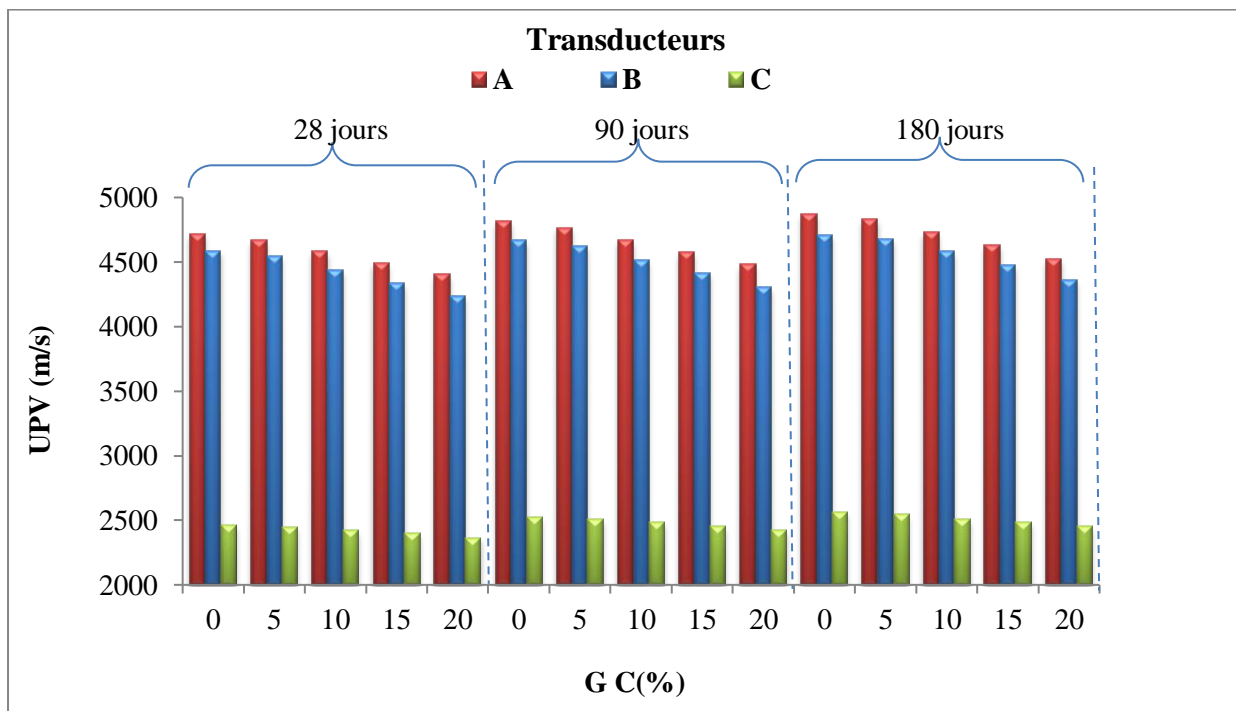


Figure 5.5. Effet du type des transducteurs sur l'évolution des vitesses ultrasoniques (BAP et BAPs).

En comparant les vitesses ultrasoniques obtenues par les transducteurs A et C, le fait de diminuer le diamètre de 7 fois (de $\varnothing_A = 49$ mm à $\varnothing_C = 7$ mm) conduit à une diminution des UPV d'environ 47% pour tous les types de bétons. La diminution de la fréquence d'environ 54% entre les transducteurs A (54 KHz) et B (25 KHz) a provoqué une baisse des vitesses se rapprochant de 4% pour tous les types de béton. Donc, on remarque bien que le diamètre des transducteurs impacte plus les résultats des vitesses que la fréquence. Les différences des vitesses ultrasoniques causées par la variation du diamètre et de la fréquence des transducteurs n'a pas été influencée par la substitution du sable par les granulats de caoutchouc quelque soit le taux de substitution.

5.2.4 Influence des attaques des milieux agressives

Pour étudier l'évolution des vitesses ultrasoniques dans des milieux agressifs (à 90 et 180 jours), nous avons immergés un groupe des éprouvettes des différents bétons dans une solution de 5% de Na_2SO_4 et d'autres dans l'eau de mer.

Les tableaux 5.2 et 5.3 et les figures de 5.6 à 5.11 présentent les résultats de cette étape.

a) L'attaque de Na_2SO_4

Les figures 5.6 à 5.8 illustrent les conséquences d'une immersion complète de différents bétons dans 5% de Na_2SO_4 sur les vitesses ultrasonores.

Une diminution des vitesses ultrasoniques a été observée pour les éprouvettes des dix différents bétons immergées dans Na_2SO_4 . Cette diminution augmente avec le temps de conservation pour l'ensemble des bétons par rapport à ceux immergés dans l'eau du robinet pendant 28 jours. Pour les BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20%, la diminution des UPV obtenue par les transducteurs A est respectivement de 2.63, 2.58, 2.22, 1.74 et 1.18% à 90 jours, et de 8.75, 7.81, 7.15, 5.39, 3.03 % à 180 jours respectivement. Pour les deux autres transducteurs, on a presque les même taux de diminution à 90 et 180 jours.

La même remarque pour le groupe BAPs avec une légère augmentation de cette perte. Une diminution de 3.27, 3.11, 2.64, 2.12 et 1.34 % à 90 jours, et de 9.19, 8.84, 7.34, 5.85, 3.92 % à 180 jours pour les vitesses obtenues par les transducteurs A pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% respectivement. Et les mêmes remarques pour les deux autres transducteurs restent aussi valables.

Tableau 5.2 Vitesses ultrasoniques des différents bétons immergés dans Na₂SO₄

UPV (m/s) (Na ₂ SO ₄)					
Transducteurs A					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
90 jours	4650,50 ± 18,92	4578,50 ± 10,02	4551,83 ± 10,75	4466,83 ± 17,82	4374,00 ± 10,67
180 jours	4358,33 ± 10,07	4332,50 ± 9,89	4322,33 ± 9,57	4300,83 ± 10,50	4292,33 ± 13,47
Transducteurs B					
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
90 jours	4563,67 ± 6,53	4524,50 ± 15,60	4459,17 ± 5,16	4398,33 ± 6,98	4347,67 ± 6,32
180 jours	4284,33 ± 2,35	4256,83 ± 9,00	4244,17 ± 13,59	4231,00 ± 6,33	4233,83 ± 13,59
Transducteurs B					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
90 jours	4504,83 ± 7,30	4434,66 ± 14,26	4387,83 ± 13,26	4295,33 ± 14,74	4197,33 ± 10,62
180 jours	4220,66 ± 6,83	4197,50 ± 9,72	4168,83 ± 9,10	4136,33 ± 7,54	4118,16 ± 14,47
Transducteurs C					
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
90 jours	4438,50 ± 11,68	4401,33 ± 2,49	4318,17 ± 6,35	4241,00 ± 20,60	4179,83 ± 8,91
180 jours	4166,67 ± 10,72	4140,67 ± 8,77	4107,17 ± 4,00	4079,17 ± 7,81	4082,00 ± 9,89
Transducteurs C					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
90 jours	2433,00 ± 18,28	2405,33 ± 10,87	2385,66 ± 9,74	2362,00 ± 8,43	2343,16 ± 13,99
180 jours	2290,00 ± 7,49	2279,50 ± 4,41	2275,33 ± 10,14	2268,16 ± 7,57	2268,83 ± 6,51
Transducteurs C					
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
90 jours	2382,33 ± 5,79	2372,50 ± 8,37	2356,83 ± 9,43	2348,17 ± 5,92	2332,83 ± 6,40
180 jours	2253,33 ± 9,97	2246,50 ± 3,74	2240,67 ± 9,20	2235,00 ± 8,98	2236,67 ± 5,73

On observant les taux de perte des vitesses ultrasoniques par rapport à une conservation dans l'eau pendant 28 jours, on remarque que les granulats de caoutchouc ont un effet positif sur la perte de vitesse ultrasonique causée par l'attaque sulfatique. Plus la teneur en caoutchouc est grande, plus le taux de perte est faible. Ceci est dû au fait que le caoutchouc est un matériau élastique et il peut absorber l'énergie d'expansion provoquée par l'ettringite, évitant ainsi

l'apparition des fissures comme déjà indiqué pour les résistances [173] et ceci conduit à la diminution de la perte des vitesses ultrasoniques.

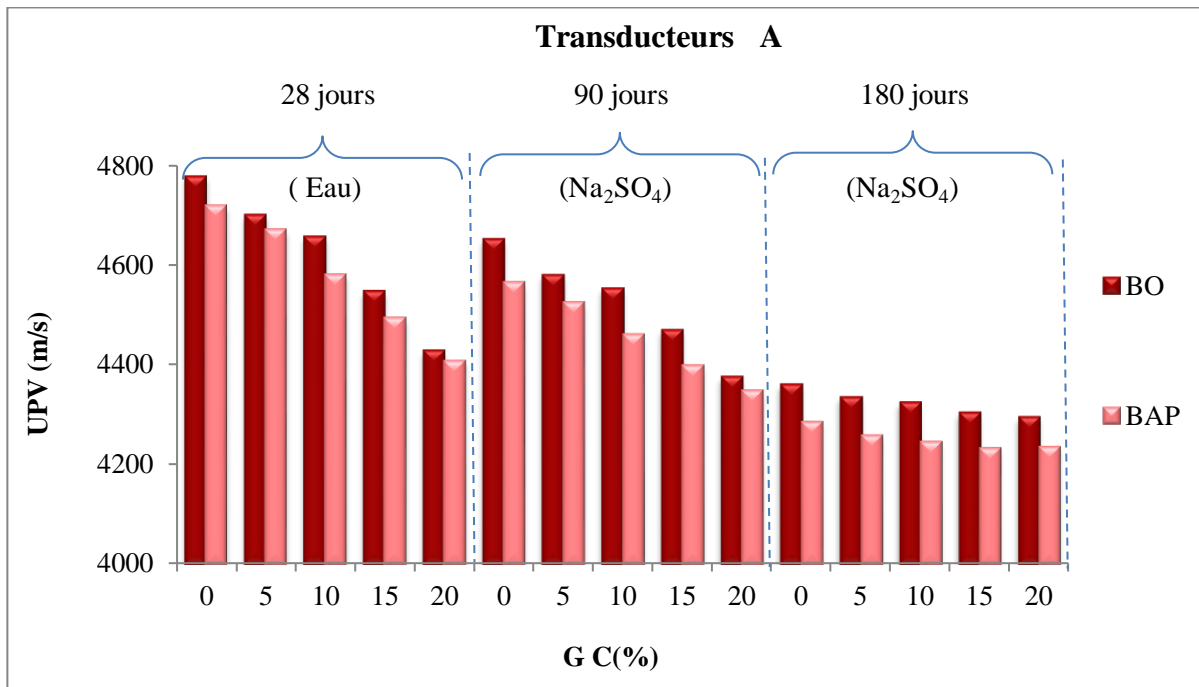


Figure 5.6. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs A) des bétons après immersion dans une solution de Na₂SO₄.

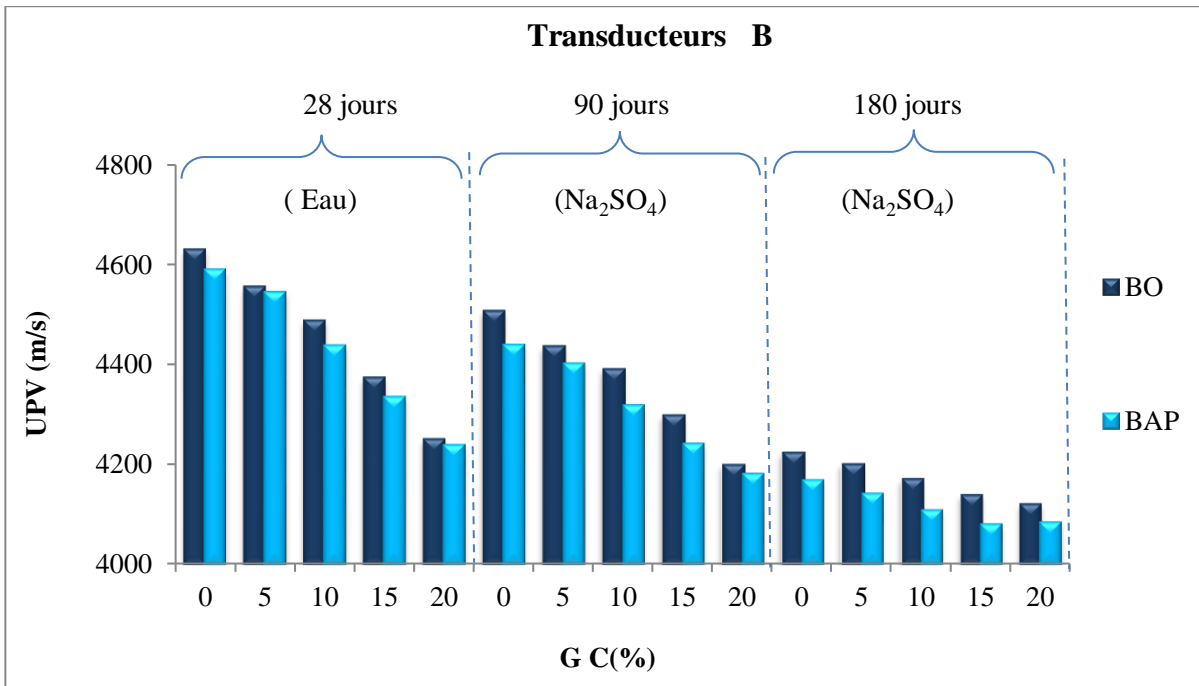


Figure 5.7. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs B) des bétons après immersion dans une solution de Na₂SO₄.

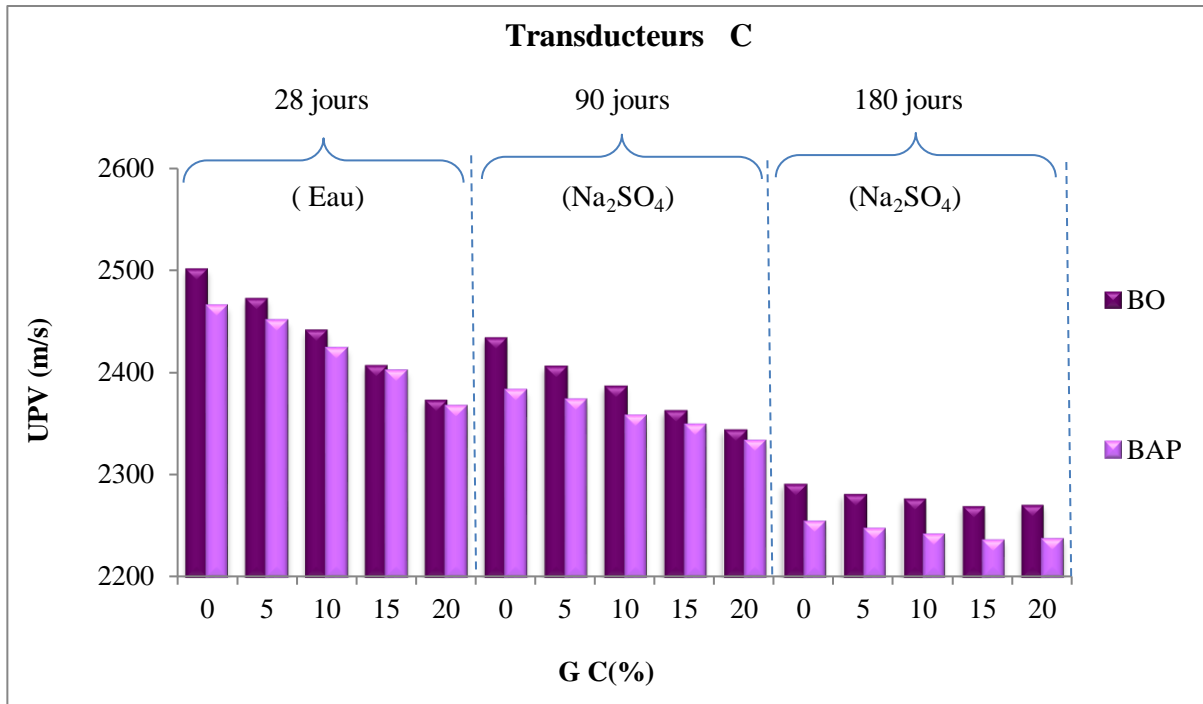


Figure 5.8. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs C) des bétons après immersion dans une solution de Na₂SO₄.

Même si des travaux [173] considèrent l'effet de cette attaque en l'évaluant par rapport à une conservation pendant 28 jours dans l'eau, il reste que cette comparaison occulte l'effet bénéfique du temps de conservation qui est conjugué à l'effet néfaste de l'agression.

On présente dans cette partie l'évolution des vitesses par rapport au même temps de conservation dans l'eau et dans la solution de Na₂SO₄.

La perte des vitesses ultrasoniques, pour les transducteurs A, pour les bétons BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% est respectivement de 5.5, 5.7, 5.1, 4.6 et 4.2% à 90 jours, et de 12.6, 11.7, 11, 9.2 et 7% à 180 jours respectivement.

Pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%, on note une diminution de 5.2, 5, 4.5, 3.9 et 2.9% à 90 jours et 12, 11.9, 10.3, 8.7 et 6.4% à 180 jours.

On remarque que les chutes des vitesses sont plus importantes que celles dans la première comparaison. L'effet bénéfique de la substitution du sable par des granulats de caoutchouc est aussi visible. Les pertes des vitesses ultrasoniques dues à l'attaque sulfatique diminuent presque de moitié, entre 5 et 20% de substitution, à 180 jours.

b) L'attaque par l'eau de mer

Les figures 5.9 à 5.11 montrent l'effet de l'eau de mer sur la vitesse ultrasonique des différents types de bétons.

En général, les bétons subissent une chute des vitesses ultrasoniques lors de leur exposition dans l'eau de mer. Cette perte augmente en augmentant la durée d'exposition et diminue en augmentant la teneur en granulats de caoutchouc.

Tableau 5.3. Vitesses ultrasoniques des différents bétons immergés dans l'eau de mer.

UPV (m/s) (Eau de mer)					
Transducteurs A					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
90 jours	4709,50 ± 4,94	4636,00 ± 4,24	4599,33 ± 7,19	4509,83 ± 16,51	4409,33 ± 7,54
180 jours	4616,33 ± 11,19	4544,66 ± 9,20	4519,50 ± 6,94	4440,50 ± 2,67	4364,50 ± 27,76
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
90 jours	4623,67 ± 0,84	4583,17 ± 17,89	4507,33 ± 5,18	4443,33 ± 15,75	4381,50 ± 11,27
180 jours	4525,50 ± 10,96	4492,33 ± 22,89	4423,67 ± 13,11	4374,33 ± 7,31	4332,33 ± 9,83
Transducteurs B					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
90 jours	4562,66 ± 16,91	4490,83 ± 6,83	4430,33 ± 13,12	4334,33 ± 9,28	4229,16 ± 10,75
180 jours	4471,16 ± 12,59	4402,66 ± 14,72	4352,66 ± 18,35	4267,83 ± 18,14	4186,50 ± 6,01
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
90 jours	4496,50 ± 8,13	4457,00 ± 4,60	4364,17 ± 6,19	4283,50 ± 17,32	4212,17 ± 11,89
180 jours	4400,67 ± 14,63	4369,33 ± 7,54	4284,17 ± 26,15	4217,50 ± 18,57	4162,67 ± 4,47
Transducteurs C					
Bétons	BO	BOC5%	BOC10%	BOC15%	BOC20%
90 jours	2466,50 ± 11,36	2438,66 ± 12,88	2411,16 ± 2,71	2386,50 ± 4,96	2362,50 ± 7,08
180 jours	2417,16 ± 2,95	2392,33 ± 9,68	2369,33 ± 13,44	2350,83 ± 3,06	2338,33 ± 9,31
Bétons	BAP	BAPC5%	BAPC10%	BAPC15%	BAPC20%
90 jours	2416,33 ± 11,04	2405,33 ± 15,46	2385,17 ± 11,24	2374,67 ± 6,83	2353,83 ± 6,76
180 jours	2365,00 ± 4,70	2357,50 ± 11,27	2341,50 ± 5,01	2336,83 ± 7,19	2327,00 ± 7,48

Les réductions de la vitesse ultrasonique, par rapport à une conservation pendant 28 jours dans l'eau, obtenues par les transducteurs A ont atteint 1.40, 1.35, 1.20, 0.80 et 0.38% et 3.35, 3.30, 2.92, 2.32 et 1.40% pour les BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% respectivement après 90 et 180 jours d'immersion dans l'eau de mer.

Pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%, une diminution des vitesses obtenues par les transducteur A est de 2.00, 1.86, 1.59, 1.12 et 0.57% à 90 jours, et de 4.08, 3.80, 3.42, 2.66 et 1.69 % à 180 jours respectivement. Pour les deux autres transducteurs, on a presque le même taux de diminution à 90 et 180 jours.

La capacité des granulats de caoutchouc de repousser l'eau, aide les bétons caoutchoutés à supporter mieux l'action du milieu marin [38]. Les granulats de caoutchouc restent intacts et peuvent empêcher la formation de fissures et la séparation des matériaux [175] ce qui conduit à diminuer la perte des vitesses par rapport au béton sans granulat de caoutchouc.

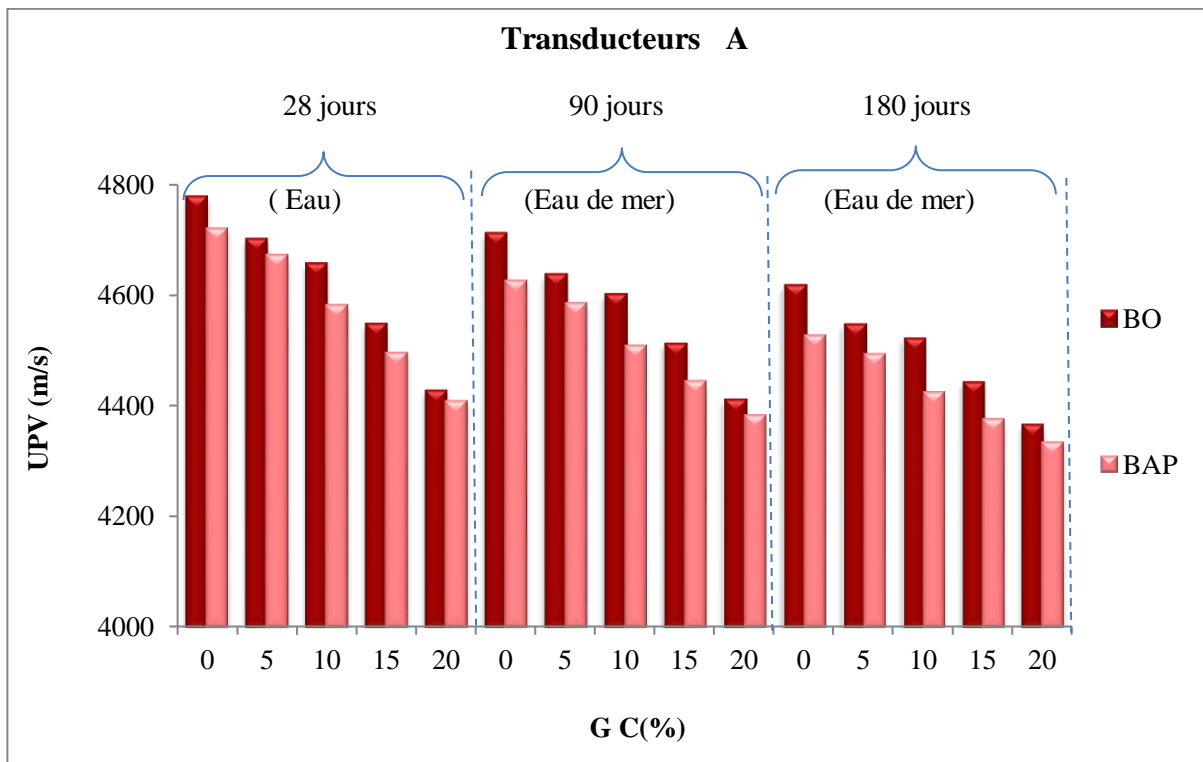


Figure 5.9. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs A) des bétons après immersion dans l'eau de mer.

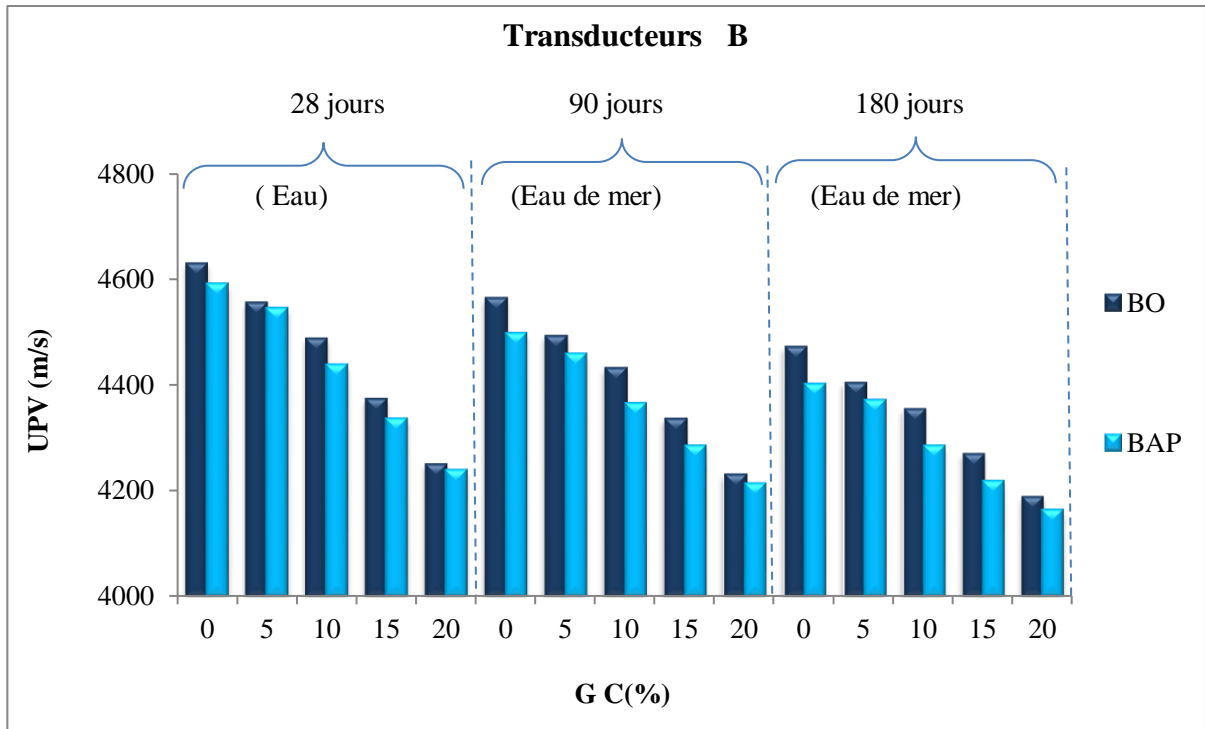


Figure 5.10. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs B) des bétons après immersion dans l'eau de mer.

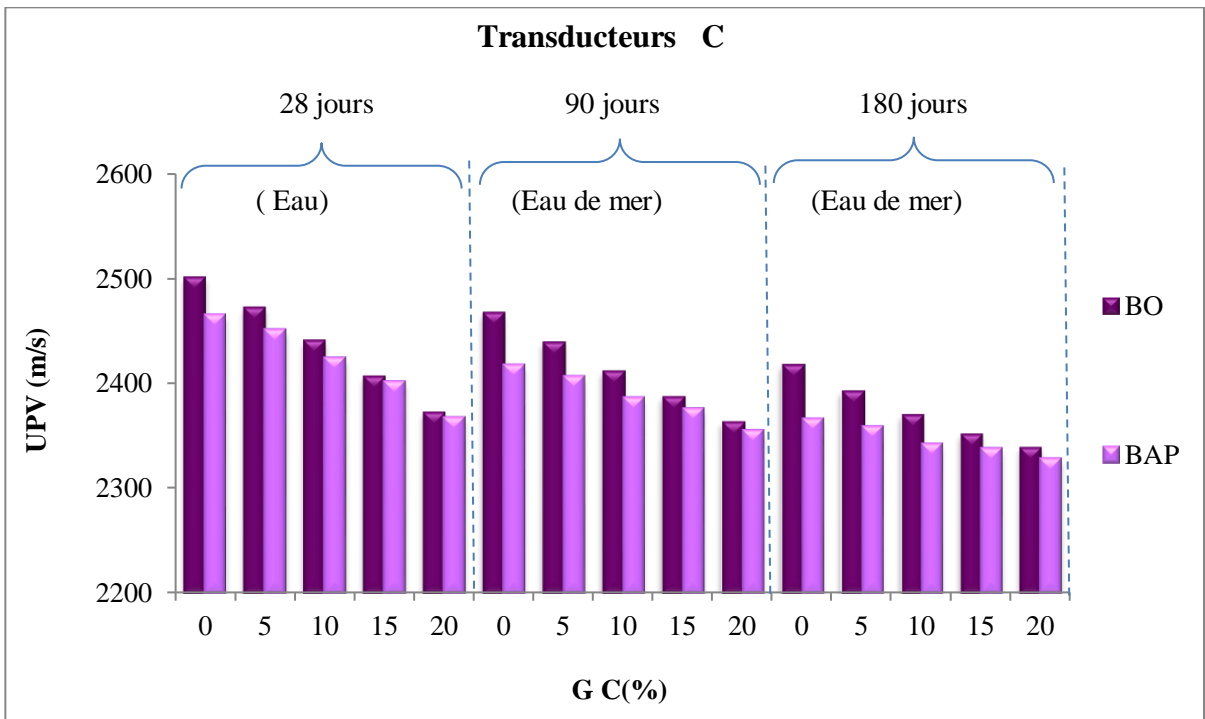


Figure 5.11. Evolution des vitesses ultrasoniques (transducteurs C) des bétons après immersion dans l'eau de mer.

Néanmoins ces chutes des vitesses restent faibles en général par rapport à celles provoquées les solutions de Na_2SO_4 . Une exposition à ces agressions pour une plus grande durée conduira à plus de régression de ces vitesses.

Les pertes des vitesses ultrasoniques sont maintenant évaluées par rapport à celles des bétons conservés dans l'eau pour les mêmes périodes. Celles des bétons ordinaires à 90 jours et 180 jours sont 4.3, 4.5, 4.2, 3.7, 3.4% et 7.5, 7.4, 6.9, 6.2, 5.4 respectivement pour BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20%. Pour les bétons autoplaçants, les pertes sont 4, 3.8, 3.5, 2.9, 2.2% et 7.1, 7, 6.5, 5.6, 4.2% respectivement pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% à 90 jours et 180 jours. Les pertes des vitesses des BAP, acquises par les transducteurs A, sont supérieures à celles des bétons ordinaires et ceci pour les mêmes raisons évoquées précédemment. L'effet bénéfique des granulats de caoutchouc est aussi visible dans ce genre d'agression où on a en général une diminution des pertes avec l'augmentation du taux de substitution.

Les transducteurs B et C donnent des pertes se situant dans l'ordre de grandeur de celles évoquées précédemment.

5.3 Comparaison entre l'évolution des vitesses ultrasoniques et des résistances à la compression

Dans cette étude, la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression sont affectées par les mêmes facteurs (type de béton, âge (28, 90 et 180 jours) et mode de cure. Nous allons donc faire une comparaison entre l'évolution de ces deux propriétés sous l'influence de ces facteurs.

5.3.1 Influence du type de béton

Le béton ordinaire (BO) et le béton autoplaçant (BAP) présentent dans leur formulation de base (sans déchets) des vitesses et des résistances proches. Le BAP a des vitesses ultrasoniques inférieures à celles du BO de 1.22% à 28 jours, 2.16% à 90 jours, et 2.44% à 180 jours pour les transducteurs A. Les deux autres transducteurs donnent des différences légèrement inférieures à celles des transducteurs A. Par contre ses résistances sont inférieures à celles du BO de 2.74 % à 28 jours, 3.85% à 90 jours et 5.12% à 180 jours.

La substitution du sable par des granulats de caoutchouc influence différemment les vitesses ultrasoniques et les résistances à la compression de ces deux bétons. A 28 jours, la substitution de 5, 10, 15 et 20% du sable par des GC conduit à des pertes des vitesses ultrasoniques de 1.60, 2.53, 4.82 et 7.33% des BOCs par rapport au BO pour les transducteurs A. Et on a des chutes

de 1.02, 2.92, 4.75 et 6.60 % des BAPCs par rapport au BAP. Ces chutes sont presque les mêmes à 90 et 180 jours pour les deux type de béton (BO et BAP).

Alors que dans le cas des résistances R_c ces pertes sont plus importantes, elles sont de 8.92, 18.85, 27.57 et 35.57 % pour la substitution de 5, 10, 15 et 20% du sable par des GC dans le BO à 28 jours. Pour le BAP à 28 jours, on a des chutes respectivement de 11.56, 24.36, 33.29 et 40.74%. A 90 et 180 jours, on les mêmes pertes qu'à 28 jours.

Il en ressort de cette comparaison que la vitesse ultrasonique est beaucoup moins influencée que la résistance à la compression par la substitution du sable par des granulats de caoutchouc. Cette chute de la résistance est presque linéairement proportionnelle au volume des GC alors que celle des vitesses ne l'est pas.

5.3.2 Influence d'âge

Le facteur âge de cure influence positivement les vitesses ultrasoniques et les résistances avec une grande différence dans cette augmentation. Pour tous les types de bétons, une augmentation maximale d'environ 4% de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores entre 28 et 180 jours a été observée pour les trois transducteurs. Tandis que dans le cas de la résistance cette augmentation atteint les 36 %.

5.3.3 Influence des attaques de Na_2SO_4 et de l'eau de mer

Comme nous avons vu, le milieu Na_2SO_4 influence négativement les vitesses ultrasoniques et les résistances.

A 180 jours, on a une diminution des vitesses de 8.75, 7.81, 7.15, 5.39, 3.03 % pour les BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% respectivement, et de 9.19, 8.84, 7.34, 5.85, 3.92 % pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% respectivement.

La résistance à la compression subit aussi une diminution dans le milieu sulfatique avec une augmentation du taux de perte par rapport à celle des vitesses. Cette perte atteinte les 13.32, 12.82, 11.17, 9.52 et 7.73% pour les BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% respectivement, et 14.03, 13.37, 11.71, 10.02 et 8.12% pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% à 180 jours.

L'eau de mer aussi affecte négativement les vitesses et les résistances. On trouve une diminution des vitesses ultrasoniques à 180 jours de 3.35, 3.30, 2.92, 2.32 et 1.40% pour les BO, BOC5%, BOC10%, BOC15% et BOC20% respectivement, et de 4.08, 3.80, 3.42, 2.66 et 1.69 % pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20%.

Alors que la substitution de 0, 5, 10, 15 et 20% du sable par les GC, démunie la résistance à la compression à 180 jours de 7.02, 6.90, 6.58, 5.98 et 5.06% pour les BO et BOCs, et de 7.72, 7.46, 7.05, 6.33 et 5.36% pour les BAP, BAPC5%, BAPC10%, BAPC15% et BAPC20% respectivement.

D'après ces résultats, comme pour le type de béton, on remarque que la vitesse ultrasonique est moins influencée par les facteurs précités (âge et mode de cure) que la résistance à la compression.

5.4 Estimation des propriétés des bétons par les vitesses ultrasoniques

Les essais non destructifs permettent d'évaluer les propriétés structurelles sans affecter leur intégrité. Dans cette partie, nous allons essayer de trouver des relations entre les propriétés mécaniques et physiques étudiées des différents bétons et les vitesses ultrasoniques correspondantes.

5.4.1 Corrélations entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la compression

Parmi les différentes caractéristiques du béton, la résistance à la compression est généralement considérée comme la propriété la plus importante. La vitesse des impulsions ultrasoniques peut constituer une alternative intéressante pour estimer cette résistance. Cependant, il est encore difficile d'avoir une évaluation précise de la résistance par la vitesse ultrasonique car cette dernière est affectée par un certain nombre de facteurs qui n'influencent pas nécessairement la résistance à la compression du béton comme avancé par des recherches [111].

Afin d'en déduire la relation Vitesse- Résistance à la compression, nous avons présenté sur les figures 5.12 à 5.20 l'évolution de cette relation incluant les trois âges (28, 90 et 180 jours) mais pour chaque type de béton (BO et BAP), de transducteurs (A, B et C) et mode de cure (eau, Na₂SO₄, eau de mer).

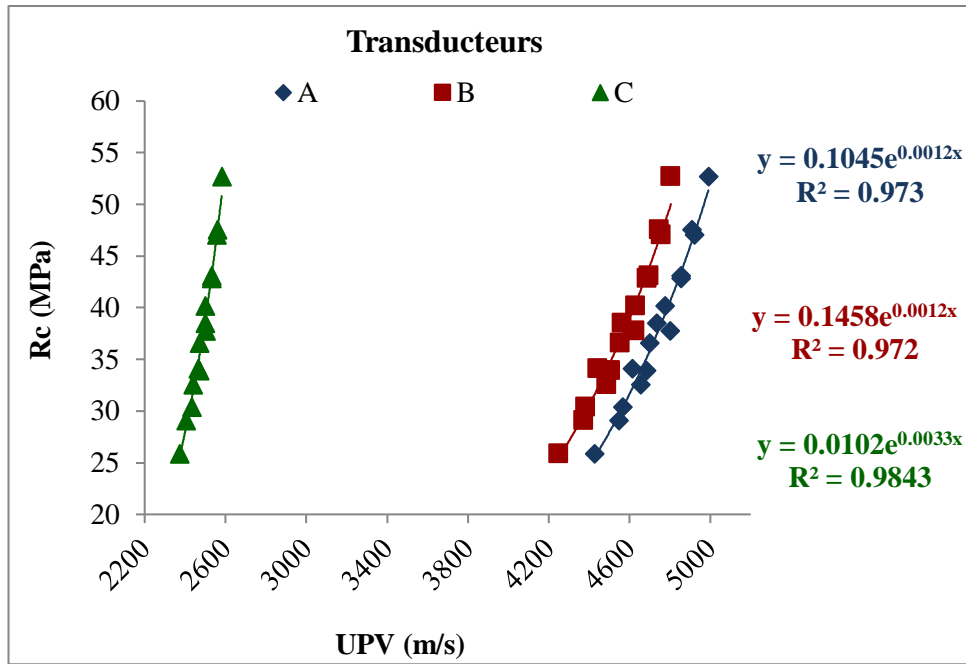


Figure 5.12. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BO et BOCs (Cure dans l'eau).

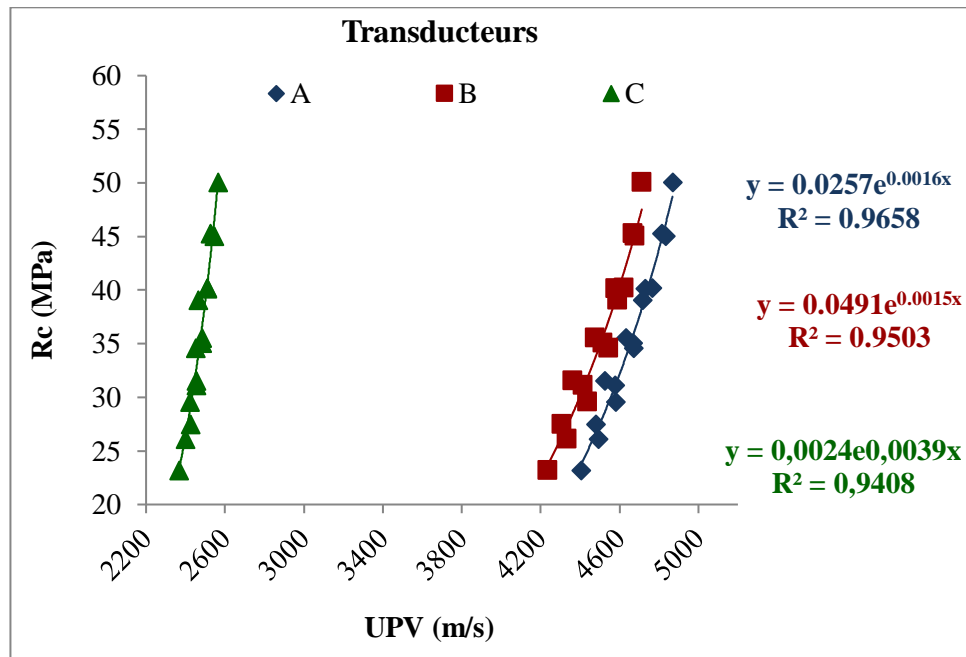


Figure 5.13. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BAP et BAPCs (Cure dans l'eau).

Sur la base des résultats expérimentaux présentés, et pour les bétons conservé dans l'eau, on observe sur les figures 5.12 et 5.13 que la résistance à la compression R_c augmente avec

l'augmentation de la vitesse UPV pour les deux groupes de bétons BO et BOCs , BAP et BAPCs .

Des relations exponentielles entre R_c et UPV obtenues par les différents transducteurs peuvent être proposés sous la forme de $R_c = ae^{b \cdot UPV}$.

Cette étude a conduit à des valeurs très élevée du coefficient de détermination (R^2) indiquant des relations fiables entre les deux variables ($R^2 > 0,97$ pour le groupe BO et BOCs et $R^2 > 0,94$ pour le groupe BAP et BAPCs, pour tous les transducteurs).

Cela confirme des études antérieures [102, 110, 111, 117, 119, 169, 176], qui indiquent que la résistance à la compression et la vitesse des impulsions ultrasonores ont une bonne relation exponentielle.

Les transducteurs A et B donnent des corrélations très proches contrairement aux transducteurs C. Ce qui confirme le rôle prépondérant du diamètre des transducteurs par rapport à leurs fréquences. Les transducteurs A et B ont les mêmes diamètres mais des fréquences différentes. Alors que les transducteurs C ont les mêmes fréquences que celles des transducteurs A mais avec un diamètre beaucoup plus faible. D'où le meilleur choix d'un grand diamètre dans toute opération d'évaluation du béton in situ.

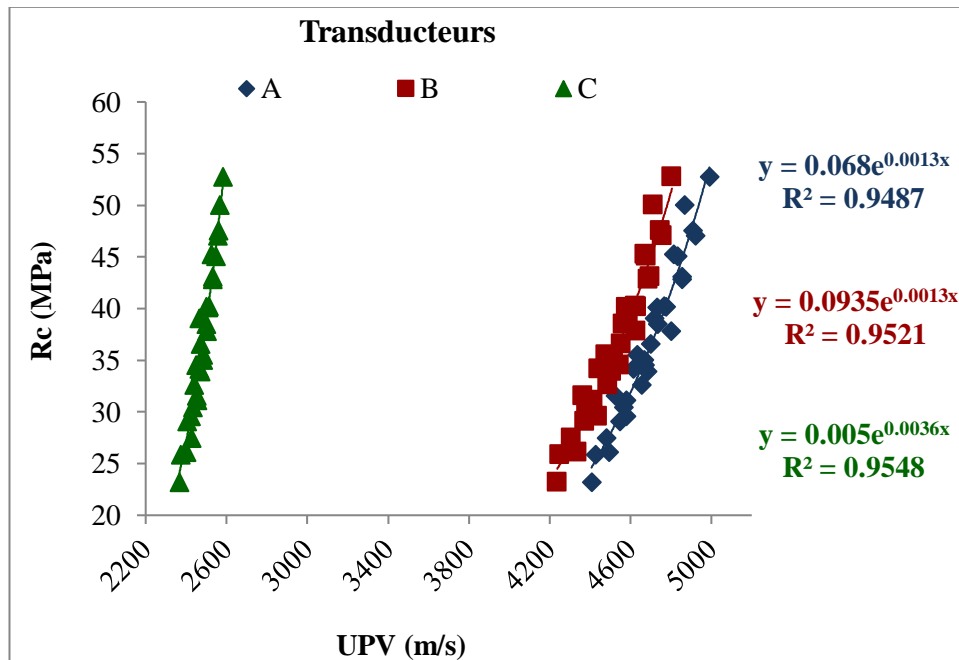


Figure 5.14. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons (Cure dans l'eau).

En faisant abstraction du type de béton (BO ou BAP), on a regroupé l'évolution des résistances en fonction des vitesses ultrasoniques de tous les bétons (Figure 5.14). Les coefficients de corrélations (R^2) pour les différents transducteurs restent toujours supérieurs à 0.9.

Les coefficients des courbes de régression (a et b) se rapprochent des valeurs moyennes des courbes des BO et BAP pris séparément.

Pour les bétons immergés dans une solution à 5% de Na_2SO_4 , la résistance à la compression augmente aussi avec l'augmentation des vitesses ultrasoniques pour les BO, BOCs et les BAP, BAPCs. Les meilleures corrélations entre ces deux propriétés sont de type linéaire ($R_c = a \text{ UPV} + b$).

Cependant, les valeurs du coefficient de détermination (R^2) varient de 0.344 à 0.606 pour les BO et BOCs et de 0.183 à 0.508 pour les BAP et BAPCs. Ce qui est loin de présenter une bonne corrélation.

En regroupant tous les bétons, les relations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances à la compression ne s'améliorent pas (Figure 5.17). On pense que cette mauvaise corrélation trouve son origine dans l'évolution des résistances et des vitesses des bétons conservés dans cette solution. On a vu précédemment que le taux de substitution du sable par des granulats de caoutchouc n'impacte pas la perte de résistance alors celle des vitesses ultrasoniques diminue avec l'augmentation de ce taux.

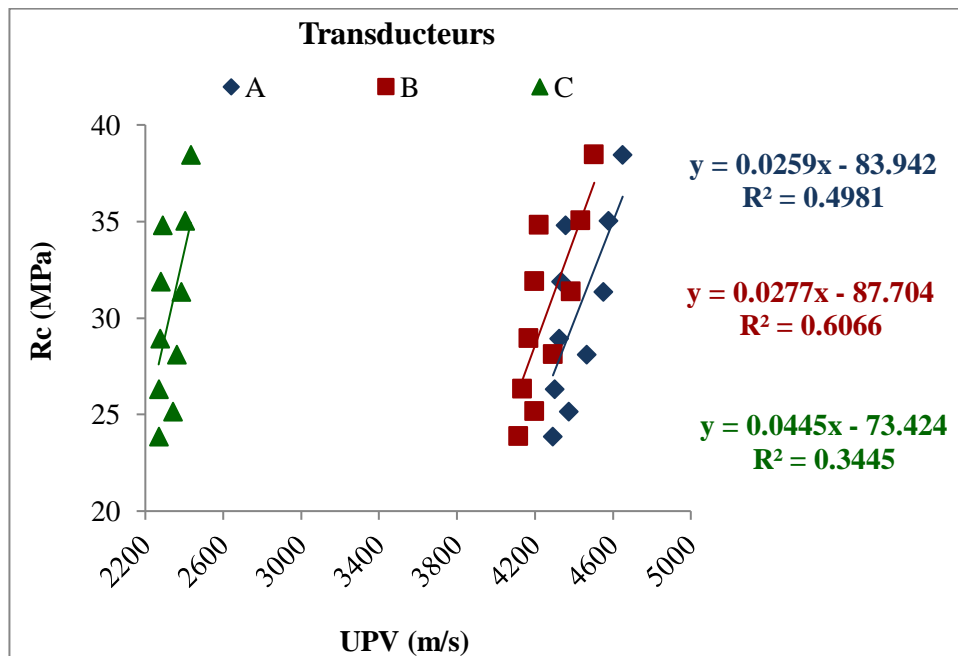


Figure 5.15. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BO et BOCs (Cure dans Na_2SO_4).

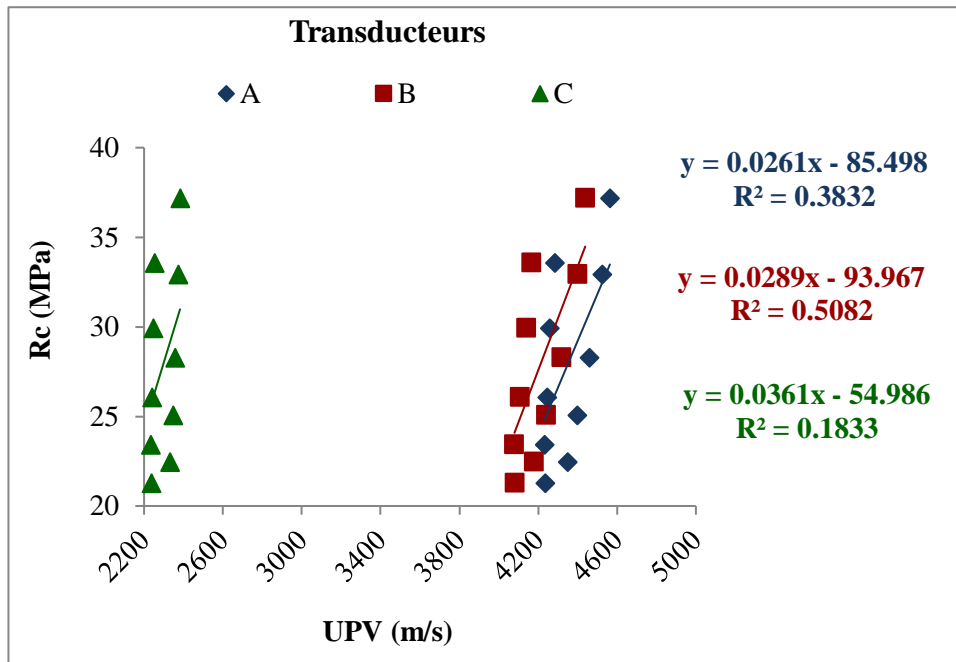


Figure 5.16. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BAP et BAPCs (Cure dans Na_2SO_4).

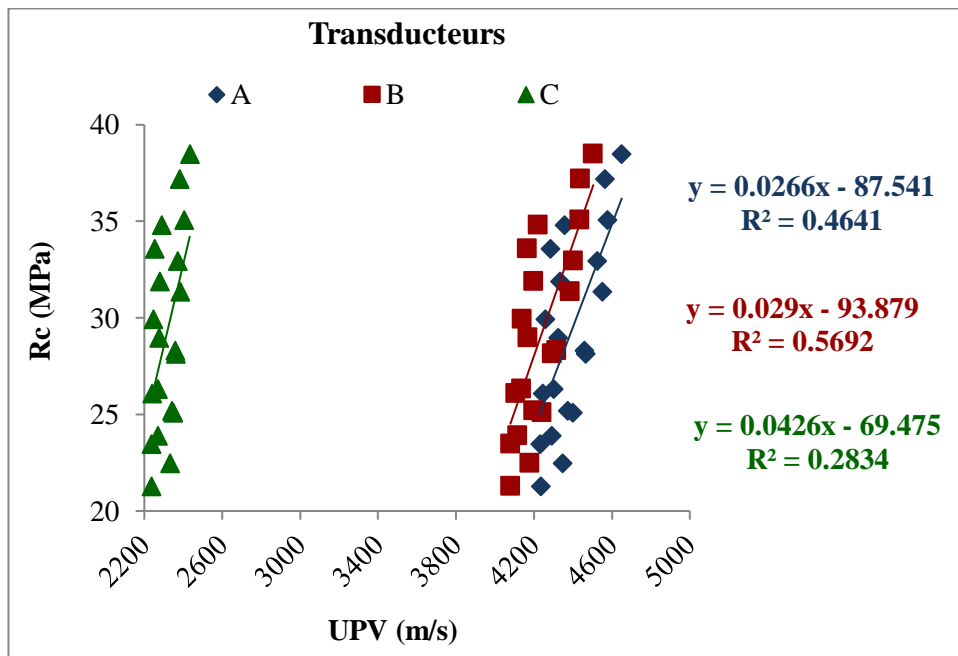


Figure 5.17. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons (Cure dans Na_2SO_4).

On a aussi des relations linéaires entre les vitesses (UPV) et la résistance à la compression (R_c) pour le mode de cure dans l'eau de mer sous la forme $R_c = a UPV + b$, mais avec des valeurs de R^2 plus élevés que celles de la cure dans Na_2SO_4 . Elles varient de 0.838 à 0.945 pour les BO et BOCs et de 0.53 à 0.91 pour les BAP et BAPCs.

Cette corrélation est beaucoup moins précise avec l'utilisation des transducteurs C avec un $R^2=0.53$.

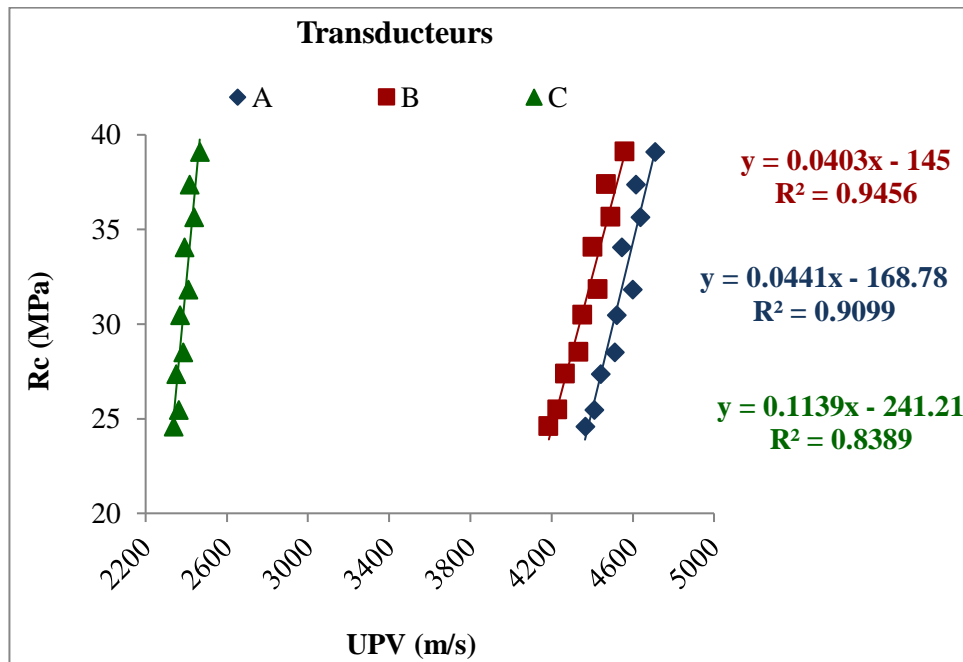


Figure 5.18. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BO et BOCs (Cure dans l'eau de mer).

Le regroupement de tous les bétons est illustré par la figure 5.20. Les coefficients de corrélations varient de 0.674 pour la régression la moins précise à 0.922 pour la plus précise. Ces relations sont plus meilleures que celles des bétons conservés dans la solution de Na_2SO_4 . Cette différence est due principalement à l'effet de ces deux agressions sur la résistance à la compression. La solution de l'eau de mer n'a pas beaucoup impacté la résistance à la compression et les chutes sont plus faibles que celles dans la première solution.

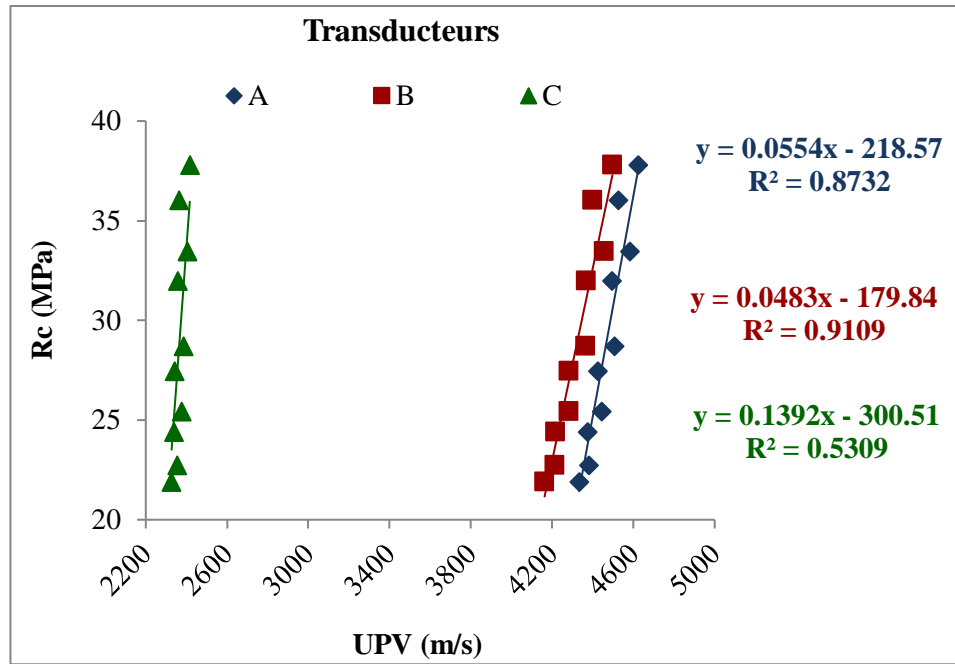


Figure 5.19. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des BAP et BAPCs (Cure dans l'eau de mer).

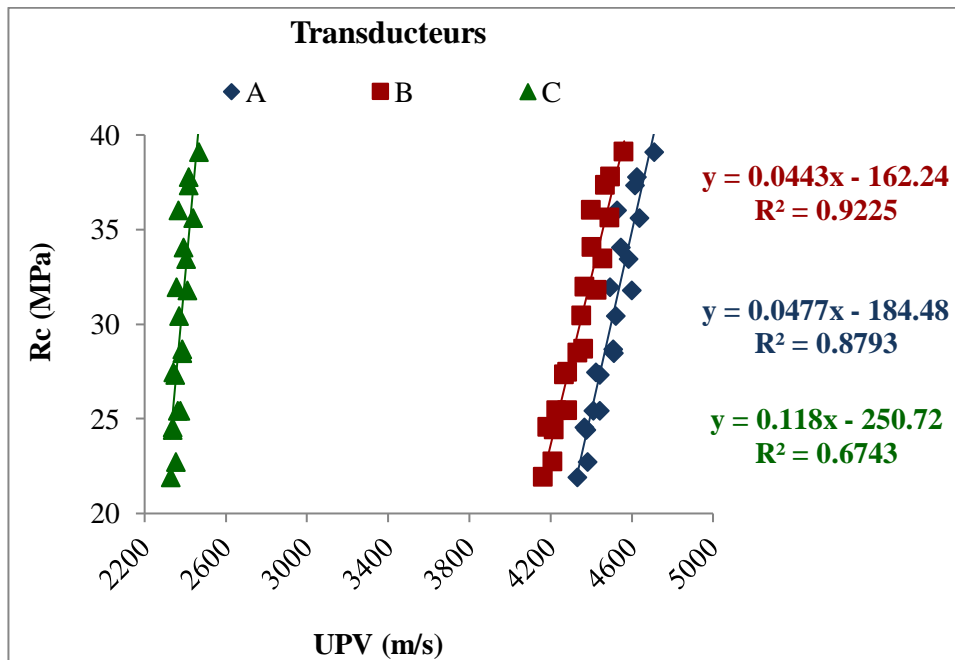


Figure 5.20. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la compression des différents bétons (Cure dans l'eau de mer).

5.4.2 Corrélations entre la vitesse ultrasonique et la résistance à la flexion

La deuxième propriété à corréler avec la vitesse ultrasonique (UPV) est la résistance à la flexion (R_f). Pour les deux groupes de bétons, les figures 5.21 et 5.22 montrent les relations entre UPV et R_f déduites pour les différents transducteurs à 28 jours de conservation dans l'eau.

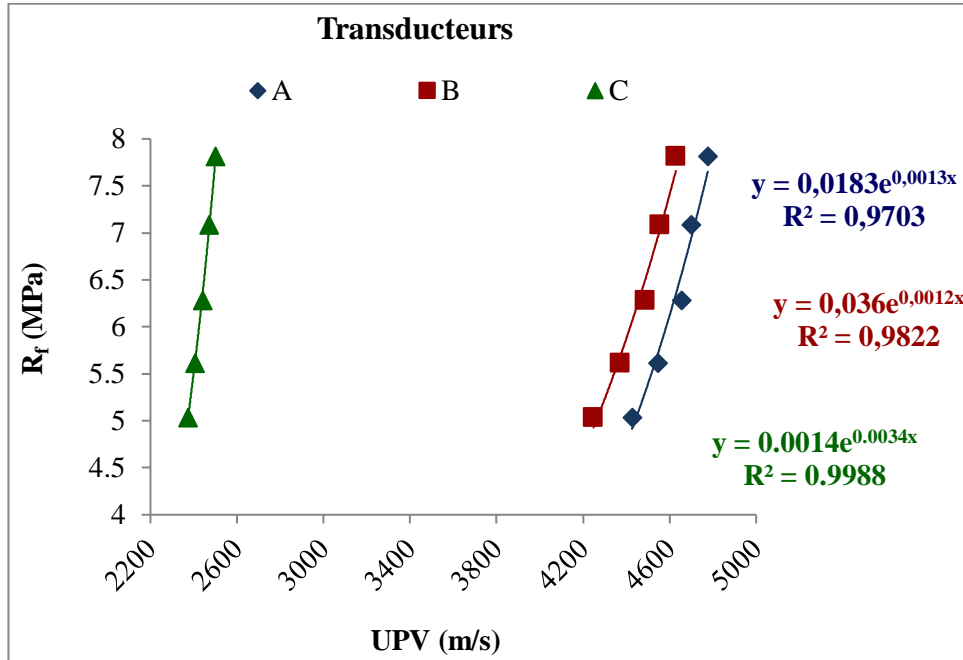


Figure 5.21. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la flexion des BO et BOCs.

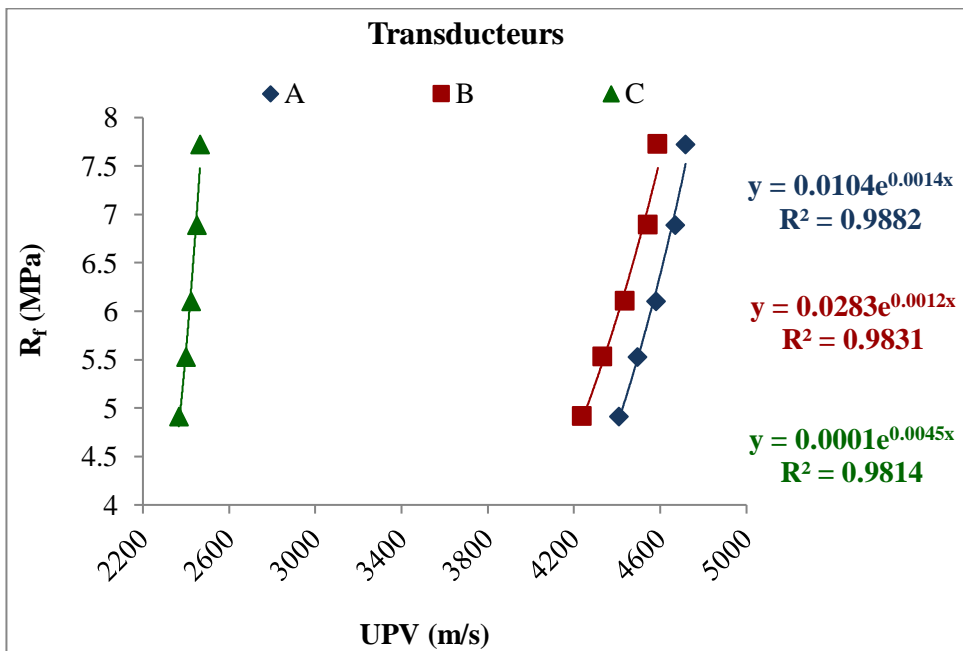


Figure 5.22. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la flexion des BAP et BAPCs.

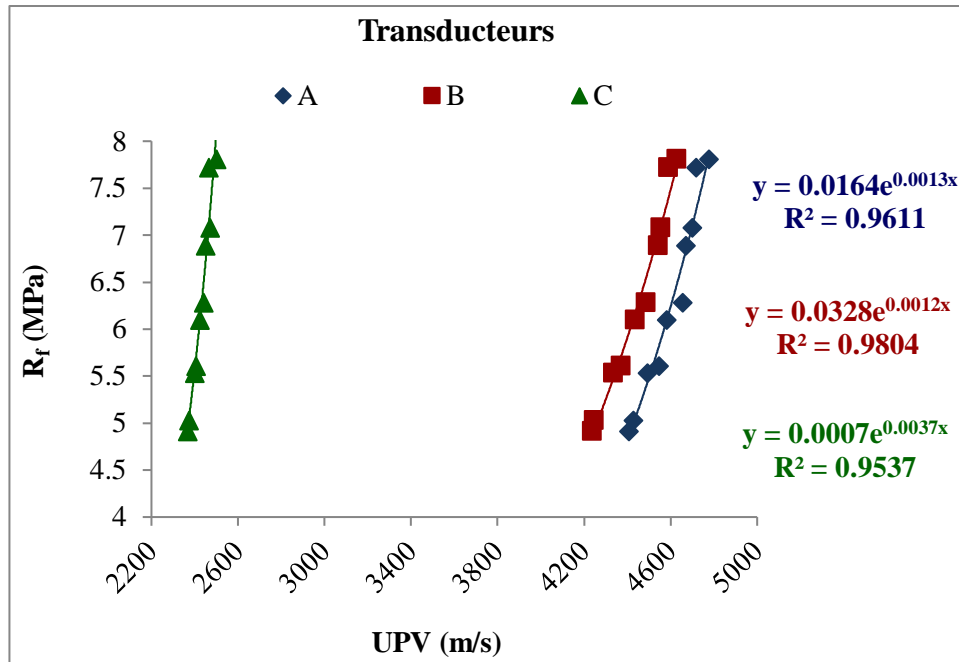


Figure 5.23. Corrélations entre les vitesses et les résistances à la flexion des différents bétons.

Aussi bien pour les bétons ordinaires que pour les bétons autoplaçants ou encore les deux types de bétons regroupés, les corrélations ont des coefficients approchant l'unité. Les relations de type exponentiel $R_f = ae^{b \cdot UPV}$ ont toutes des coefficients $R^2 > 0,95$ pour tous les transducteurs. Ce qui indique la fiabilité de déterminer la résistance à la flexion par cette technique non destructif pour tous les différents bétons.

5.4.3 Corrélation entre la vitesse ultrasonique et la porosité

Les figures 5.24 et 5.25 montrent les corrélations entre l'UPV et la porosité accessible à l'eau (P), après une cure dans l'eau pendant 28 jours. La porosité est largement reconnue comme un indicateur de la durabilité du béton, donc la caractérisation de cette propriété d'une manière non destructive serait intéressant surtout pour des investigations in-situ. Nous avons noté une relation inversement proportionnelle entre la vitesse ultrasonique et la porosité.

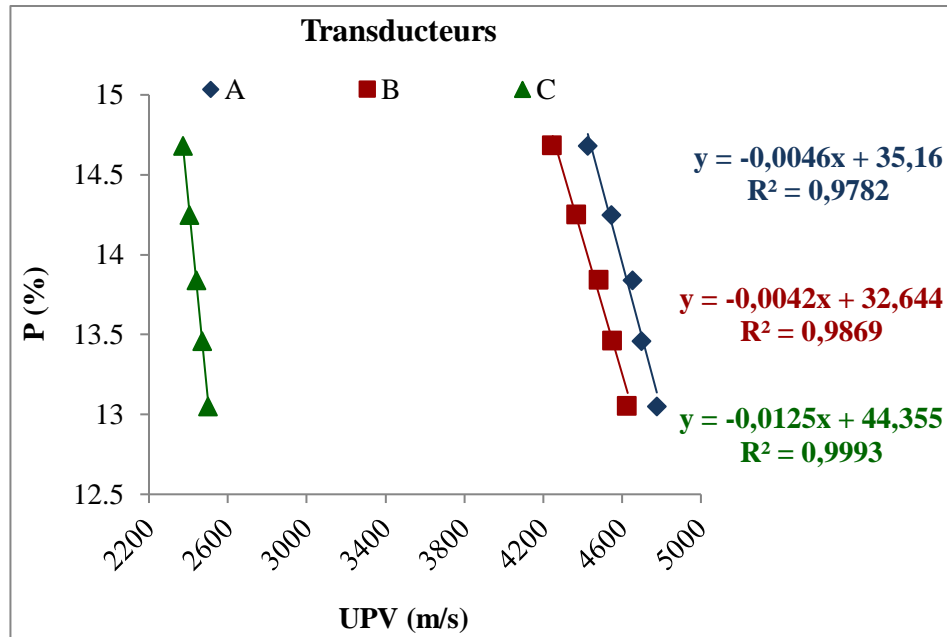


Figure 5.24. Corrélations entre les vitesses et les porosités des BO et BOCs.

On remarque que l'accroissement de la porosité conduit à une diminution de la vitesse ultrasonique, ceci est observé pour les deux groupes de bétons.

L'évolution de la porosité de 12,49 % conduit à une diminution de la vitesse de 7.33, 8.22 et 5.13% respectivement pour les transducteurs A, B et C pour les BO et BOCs. Dans le cas du groupe des bétons autoplaçants, l'augmentation de 13,28% de la porosité correspond à une diminution des vitesses de 6.60, 7.66 et 3.96% pour les transducteurs A, B et C respectivement. La meilleure corrélation entre ces deux propriétés est de type linéaire ($P = a UPV + b$) pour tous les transducteurs avec des coefficients de déterminations très élevés ($R^2 > 0,97$).

Dans d'autres travaux [122, 127, 139], les auteurs ont aussi conclu à une bonne relation linéaire entre la porosité et l'UPV dans des mélanges de béton avec des granulats naturels.

Comme pour l'estimation des résistances, les corrélations obtenues par les transducteurs de même fréquence (A et B) pour les deux groupes de béton sont proches alors que les transducteurs C présentent un certain décalage de cette relation.

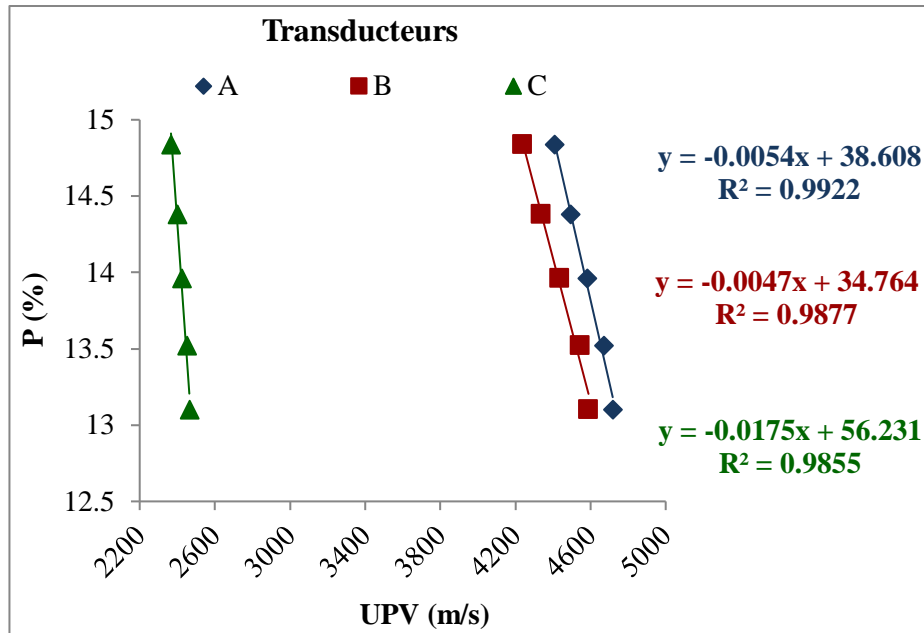


Figure 5.25. Corrélations entre les vitesses et les porosités des BAP et BAPCs.

Le fait de considérer tous les bétons (Figures 5.26) pour en déduire des corrélations n'a pas introduit des imprécisions. On a même des coefficients de corrélation supérieurs à 0.95 et toujours les relations similaires des deux transducteurs A et B. Encore une fois, on estime que les vitesses ultrasoniques présentent une estimation très précise de cet indicateur de la durabilité qu'est la porosité accessible à l'eau.

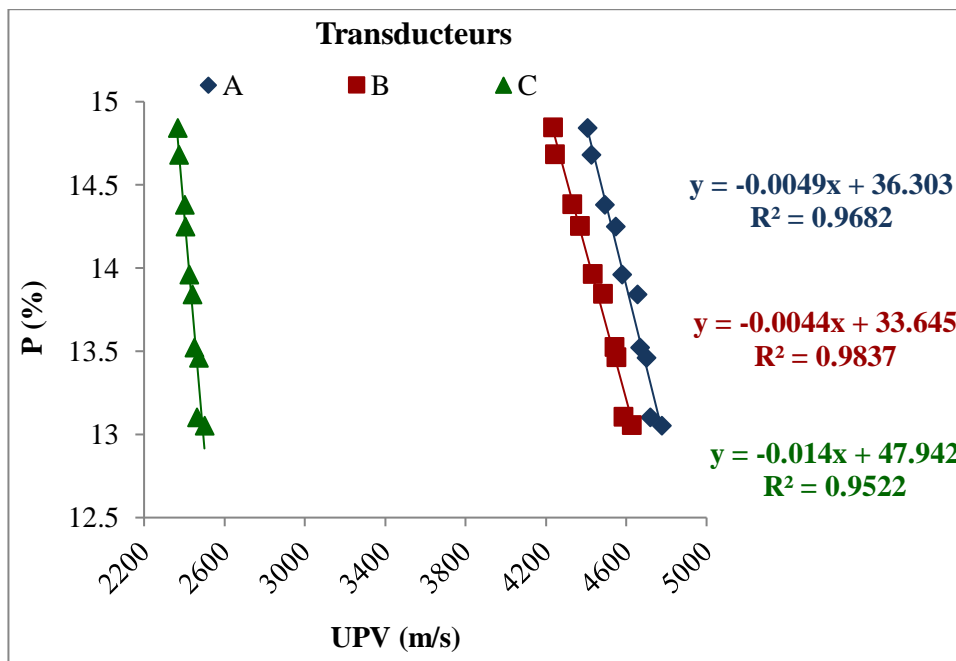


Figure 5.26. Corrélations entre les vitesses et les porosités des différents bétons.

5.4.4 Corrélations entre la vitesse ultrasonique et la masse volumique apparente

Les figures 5.27 et 5.28 montrent que la masse volumique est également bien corrélée à la vitesse des ultrasons ($R^2 > 0,98$).

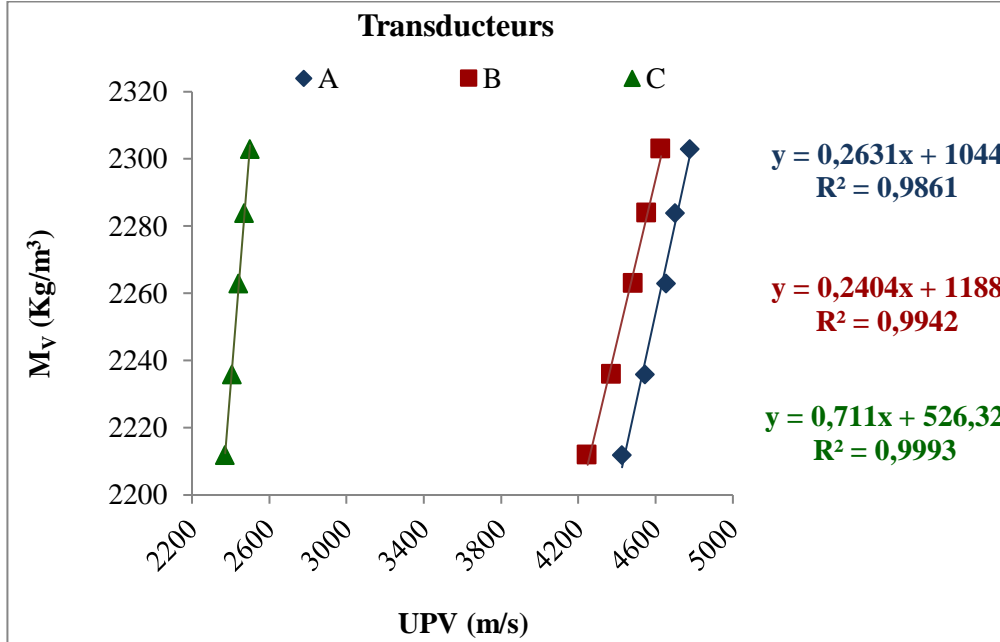


Figure 5.27. Corrélations entre les vitesses et les masses volumiques des BO et BOCs.

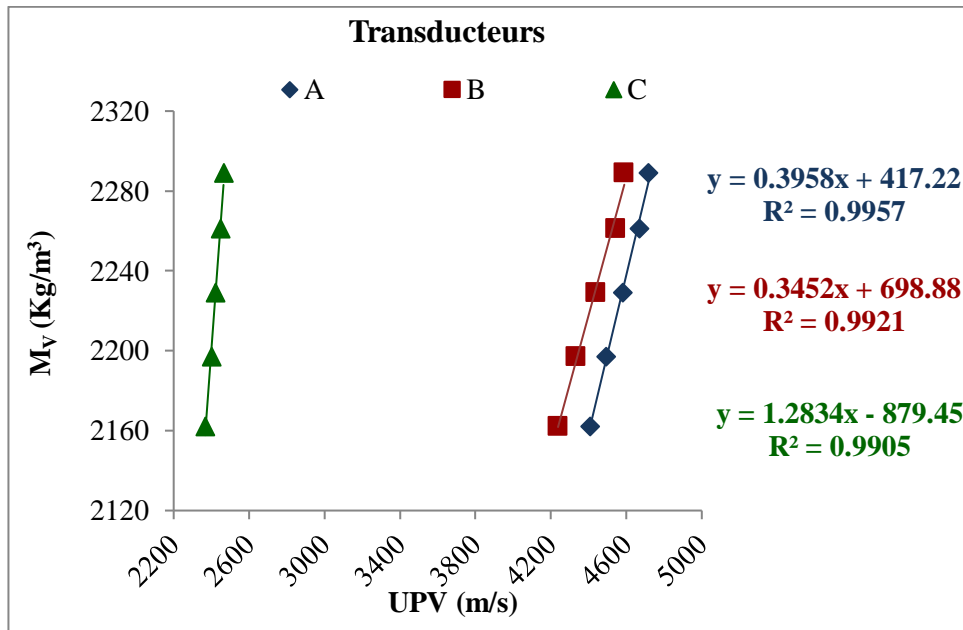


Figure 5.28. Corrélations entre les vitesses et les masses volumiques des BAP et BAPCs.

Les régressions entre la vitesse ultrasonore et la masse volumique apparente sont toujours de type linéaire et prennent la forme : $M_V = a UPV + b$.

La baisse de 3.95 % de la M_V par la substitution de 20% de sable par des GC fait chuter la vitesse ultrasonique de 7.33, 8.22 et 5.13% respectivement pour les transducteurs A, B et C pour les BO et BOCs. Dans le cas du groupe des bétons autoplaçants, cette baisse de la masse volumique apparente de 5.5% correspond à une diminution des vitesses de 6.60, 7.66 et 3.96% pour les transducteurs A, B et C respectivement.

Les remarques faites dans le cas de la porosité en terme de corrélations aux vitesses ultrasoniques restent valables pour la masse volumique apparente. Les corrélations de l'ensemble des bétons sont regroupées dans la figure 5.29. On y remarque toujours des régressions linéaires avec des coefficients importants mais légèrement inférieurs à ceux des deux types de béton pris séparément.

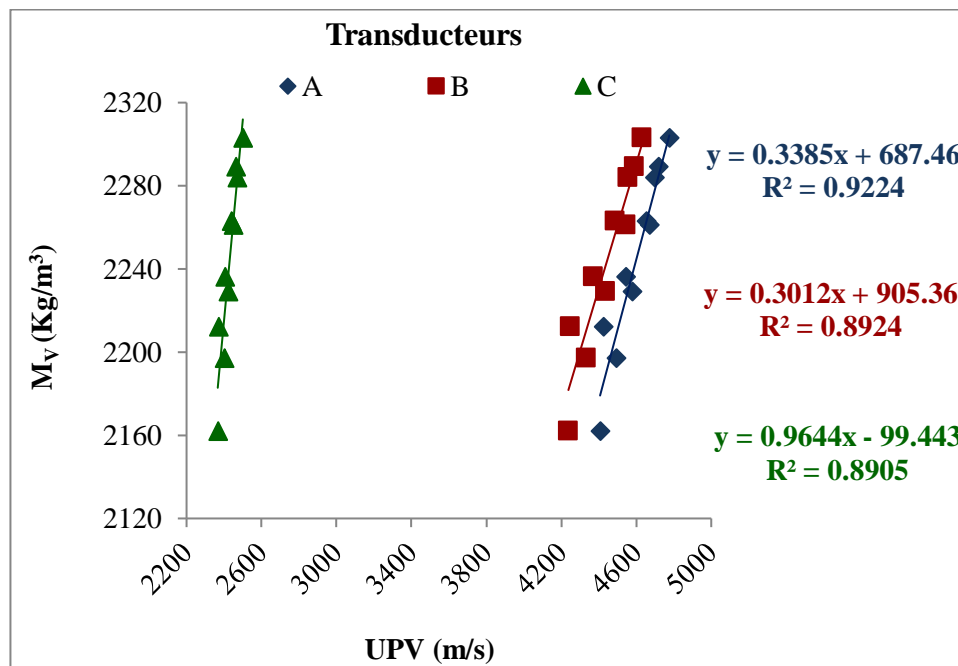


Figure 5.29. Corrélations entre les vitesses et les masses volumiques des différents bétons.

5.5 Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé à étudier l'évolution des vitesses ultrasoniques dans différents types de béton et de l'utiliser pour caractériser les propriétés physiques et mécaniques de ces bétons. L'analyse des résultats expérimentaux peut mener aux conclusions suivantes :

- Les valeurs des vitesses ultrasoniques les plus élevées sont celles obtenues pour les bétons ordinaires (BO) à tous les âges et pour les trois transducteurs. La substitution du sable par des granulats de caoutchouc (GC) dans le BO et le BAP a conduit à une diminution des vitesses ultrasoniques. Cette diminution augmente avec le taux de la teneur en GC.
- La vitesse ultrasonique augmente avec l'augmentation du temps de durcissement. Plus le temps de durcissement est long, plus l'hydratation de la pâte est grande. Il en résulte un volume de pores plus faible qui donne une lecture plus élevée des vitesses.

Pour le BO et BOCs, une augmentation d'environ 4% de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores entre 28 et 180 jours. Cette évolution des vitesses ultrasoniques des bétons avec l'âge est indépendante du type de transducteurs. Tandis qu'entre 90 et 180 jours cette augmentation reste très faible. Ceci reflète la cinétique du durcissement du béton et l'évolution de sa résistance dans le temps.

Les mêmes remarques pour l'effet de l'âge sur les vitesses sont observées dans le cas des BAP et BAPCs avec des taux d'augmentation légèrement inférieurs à ceux des BO et BOCs. On peut donc conclure aussi que l'âge du béton n'affecte pas la diminution des vitesses ultrasoniques causée par l'incorporation de particules de caoutchouc, soit dans le cas des BOCs ou bien celui des BAPCs.

- Les transducteurs A, avec le plus grand diamètre et la fréquence la plus élevée, donnent les vitesses les plus élevées pour tous type de béton et à tous les âges. Tandis que les transducteurs C avec le petit diamètre et la grande fréquence donnent les plus petites vitesses ultrasoniques.
- Une diminution des vitesses d'environ 47% pour tous les types de béton est causée par une diminution du diamètre des transducteurs de 7 fois (de $\varnothing_A = 49$ mm à $\varnothing_C = 7$ mm). Une diminution de fréquence d'environ 54% entre les transducteurs A (54 KHz) et B (25 KHz) a provoqué une baisse de vitesse de 4% pour tous les types de béton. Cette différence des vitesses causée par la variation du diamètre et de la fréquence des transducteurs n'a pas été influencée par la substitution du sable par les granulats de caoutchouc quelque soit le taux de substitution.

- Les cures dans une solution de Na_2SO_4 et l'eau de mer ont conduit à une perte des vitesses. Cette perte augmente avec le temps de conservation et diminue en augmentant la teneur en granulats de caoutchouc. L'effet des Na_2SO_4 sur la vitesse ultrasonique des différents bétons est plus agressif que celui de l'eau de mer. Les pertes des vitesses pour les BO et BOCs sont légèrement inférieures à celles des BAP et BAPCs.
- Les résistances en compression et en flexion des bétons conservés dans l'eau, présentent de très bonnes corrélations aux vitesses ultrasoniques. Ces corrélations sont de type exponentiel avec des coefficients « R^2 » proche de l'unité. Les transducteurs A et B, de même diamètre, donnent des corrélations très proches contrairement aux transducteurs C. Ce qui confirme le rôle prépondérant du diamètre des transducteurs par rapport à leur fréquence. Les agressions chimiques par du Na_2SO_4 et l'eau de mer ont impacté les relations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances à la compression. Les meilleures corrélations sont de type linéaire mais elles sont relativement imprécises dans le cas de l'agression par du Na_2SO_4 .
- Les résistances à la flexion sont très bien corrélées aux vitesses ultrasoniques et leurs courbes présentent des coefficients de corrélation proche de l'unité.
- Quant à l'estimation de la porosité et de la masse volumique apparente, elles sont bien obtenues à partir de régressions linéaires.
- Donc, en général on peut conclure qu'on peut estimer la majorité des propriétés étudiées des bétons à travers l'utilisation de cette méthode non destructive qu'est la vitesse des pulsations ultrasoniques.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a concerné l'étude de l'évolution des vitesses ultrasoniques dans une variété de bétons et l'exploitation de cette technique pour en déduire leurs propriétés ainsi que l'état d'endommagement provoqué par quelques agressions chimiques. Les facteurs pris en compte pour en déduire l'évolution des propriétés et des vitesses sont de types internes et externes. Les facteurs internes sont le type des bétons (béton ordinaire BO, bétons ordinaires avec caoutchouc BOCs, Béton autoplaçant BAP et BAP avec caoutchouc BAPCs). Les facteurs externes sont le type des transducteurs (diamètre et fréquence), l'âge des bétons et le milieu de cure.

Les compositions du béton ordinaire et du béton autoplaçant ont été modifiées par la substitution d'une partie du sable par des granulats de caoutchouc issus du broyage des pneus usagés. Cette modification a impacté les propriétés de ces bétons aussi bien à l'état frais que durci et aussi à leur état sain et endommagé.

A l'état frais, l'effet des granulats de caoutchouc a fait augmenter l'ouvrabilité et la teneur en air et fait chuter la densité des différents bétons.

A l'état durci, les granulats de caoutchoucs incorporés dans le BO et le BAP sont préjudiciables aux différentes propriétés. La chute de résistance à la compression semble indifférente à l'âge du béton. Les BAP présentent des chutes légèrement plus importantes que les BO. On a des chutes maximales de 41% pour les BAP contre moins de 36% pour les BO. La résistance à la flexion subit aussi des chutes par l'incorporation des granulats de caoutchouc en substitution au sable. Les deux types de béton présentent des chutes maximales similaires au alentour de 36%.

Une augmentation de la porosité et une diminution de la masse volumique apparente des BOCs et BAPCs sont obtenues avec l'augmentation du taux de granulats de caoutchouc en substitution volumique du sable naturel par rapport au BO et BAP. Les valeurs de porosité des BO sont très légèrement inférieures à celles des BAP. Les augmentations de la porosité reflètent fidèlement les chutes constatées des résistances. L'augmentation de la porosité évolue proportionnellement aux volumes de GC incorporés. Les augmentations de la porosité des BOC10%, BOC15% et BOC20% représentent respectivement 2, 3 et 4 fois celle du BOC5%. La même remarque concerne aussi les BAPCs.

La masse volumique apparente du béton ordinaire BO diminue de moins de 4% pour le béton ordinaire le moins dense et la chute maximale pour les BAP atteint 5.5%.

Le taux de perte des résistances en compression, provoqué par l'attaque Na_2SO_4 , des BAP est légèrement supérieur à celui des BO. Cela peut s'expliquer par la porosité élevée du groupe des bétons BAP par rapport au BO. Les pertes de résistance, par rapport à la résistance à 28 jours de conservation dans l'eau, varient à 180 jours, de 7.7 à 13.3% et de 8.1 à 14% respectivement pour les BO et les BAP. Ces chutes de résistance évoluent inversement au volume des GC.

Cependant, ce paramètre est beaucoup moins influençant quant on procède à une comparaison pendant la même durée de conservation. On a une perte moyenne, à 180 jours, de 32% pour les BO contre 33.6% pour les BAP.

Les pertes de résistance due à l'attaque par l'eau de mer, par rapport à la résistance à 28 jours de conservation dans l'eau, varient à 180 jours de 5.1 à 7% et de 5.3 à 7.7% respectivement pour les BO et les BAP. Si on considère les mêmes durées de conservation, on trouve que la conservation dans l'eau de mer par rapport à la conservation dans l'eau a provoquée une chute moyenne à 180 jours, de 28.7% pour les BO et de 30% pour les BAP. Le taux de perte des résistances en compression des BAP est légèrement supérieur à celui des BO. La durée de l'attaque provoque une augmentation de cette chute de résistances.

Le béton ordinaire BO donne les valeurs les plus élevées des vitesses ultrasoniques à tous les âges et pour les trois transducteurs. La substitution du sable par des granulats de caoutchouc (GC) dans le BO et le BAP a conduit à une diminution des vitesses ultrasonores. Cette diminution augmente avec la teneur en GC.

Les vitesses augmentent avec l'augmentation du temps de durcissement. Cette augmentation est rapide dans les premiers jours de durcissement et s'est ensuite poursuivie à un rythme plus lent.

Le grand diamètre et la fréquence la plus élevée des transducteurs conduit aux vitesses maximales. Tandis que le diamètre le plus faible des transducteurs donne les plus petites vitesses ultrasoniques. Une diminution des vitesses d'environ 47% pour tous les types de béton est causée par une diminution du diamètre des transducteurs dans rapport de sept. Une diminution de fréquence des transducteurs d'environ 54% conduit à une baisse des vitesses de 4% pour tous types de béton.

Les deux milieux agressifs - Na_2SO_4 et l'eau de mer- sont préjudiciables pour l'évolution de la vitesse ultrasonique. L'endommagement s'accroît avec le temps de conservation mais s'affaiblit en augmentant la teneur en granulats de caoutchouc dans les bétons. L'effet des Na_2SO_4 sur la vitesse ultrasonique des différents bétons est plus agressif que celui de l'eau de mer.

La vitesse ultrasonique est moins affectée par le type et l'âge de béton ainsi que le milieu de cure que la résistance à la compression.

Les résistances en compression et en flexion, des bétons conservés dans l'eau, présentent de très bonnes corrélations aux vitesses ultrasoniques. Ces corrélations sont de type exponentiel avec des coefficients « R^2 » proche de l'unité. Les transducteurs A et B, de même diamètre, donnent des corrélations très proches contrairement aux transducteurs C. Ce qui confirme le rôle prépondérant du diamètre des transducteurs par rapport à leur fréquence.

Les agressions chimiques par du Na_2SO_4 et l'eau de mer ont impacté les relations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances à la compression. Les meilleures corrélations sont de type linéaire mais elles sont relativement imprécises dans le cas de l'agression par du Na_2SO_4 . Quant à l'estimation de la porosité et de la masse volumique apparente à partir des vitesses ultrasoniques, elles sont bien obtenues à partir de régressions linéaires.

L'estimation des propriétés étudiées des différents bétons en utilisant méthode non destructive à travers les vitesses ultrasoniques est une alternative plausible. Elle conduit à une économie du temps et du matériel pour un diagnostic ou une caractérisation des bétons.

Les perspectives à cette étude concernent la recherche des paramètres ayant conduit aux imprécisions des relations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances en milieu de Na_2SO_4 et aussi prospecter d'autres aussi agressifs.

Une expérimentation plus fournie en terme de différentes compositions des bétons pour une étude statistique plus fiable.

La prospection de l'estimation par les ultrasons d'autres indicateurs de durabilité des bétons (perméabilité, autres attaques, ...) pour en proposer un seul indicateur de la durabilité basé sur les ultrasons. Enfin, essayer d'exploiter d'autres propriétés des ultrasons comme l'atténuation, ...etc.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Dreux, G., Festa, J. (1998). Nouveau guide du béton et de ses constituants, 8ème édition, Eyrolles.
- [2] Quiviger, A. (2012). Ultrasons diffus pour la caractérisation d'une fissure dans le béton Approche linéaire et non linéaire, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, France.
- [3] Ting, Y. (2018). Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans le béton pour l'amélioration du diagnostic des structures de génie civil, Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille, France.
- [4] Guide pratique du béton (janvier 2015). Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables, Holcim (Suisse) SA, 6^{ème} édition (français, édition Suisse).
- [5] NF-EN-206-1 (Avril 2004) : Béton - partie 1 : Spécification, performances, production et conformité. AFNOR, Indice de classement : P18-325-1.
- [6] Cimbéton (2006). Fiches Techniques, Tome 2, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, Paris.
- [7] Guide pratique du béton (2009). Concevoir et mettre en œuvre des bétons durables, Holcim (Suisse) SA, 5^{ème} édition.
- [8] Chekroun, M. (2008). Caractérisation mécanique des premiers centimètres du béton avec des ondes de surface. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France.
- [9] Fnine, A. (2006). Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence. Thèse de doctorat, Université Des Sciences Et Technologies, Lille, France.
- [10] Sedran, T. (1999). Rhéologie et rhéomètre des bétons. Application aux bétons autonivelants. Thèse de doctorat, L'école Nationale des Ponts et Chaussées, France.
- [11] Ozawa, K., Tangtermsirikul, S. and Maekawa, K. (1992). Role of powder materials on the filling capacity of fresh concrete, Proceeding of the first international symposium of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Istanbul, Turkey .
- [12] Okamura, H., Ouchi, M. (2003). Self compacting concrete. Journal of advanced concrete technology, Vol1, N°1, 5-15 April.
- [13] Khelifa, M.R. (2009). Effet de l'attaque sulfatique externe sur la durabilité des bétons autoplacants. Thèse de doctorat, Université de Constantine et Université d'Orléans.
- [14] Association Française de Génie Civil (AFGC) (Juillet 2002). Bétons autoplacants – Recommandations provisoires.

- [15] Bethmont, S. (2005). Mécanismes de ségrégation dans les Bétons autoplaçants (BAP)- Etude expérimentale des interactions granulaires. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [16] Bensebti, S. E. (2008). Formulation et Propriétés des Bétons Autoplaçants à Base de Matériaux Locaux. Thèse de doctorat, Université mentouri-constantine.
- [17] Paco, D. (2010). Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- [18] Assié, S. (2004). Durabilité des bétons autoplaçants. Thèse de doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Toulouse.
- [19] Felekoglu, B., Yardimci, M., Baradan, B. (2003). A comparative study on the use of mineral and chemical types of viscosity enhancers in self-compacting concrete. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland :446{456.
- [20] Shi, C., Wu, Y., Shao, Y., Rieer, M. (2002). Comparison of two design approaches for self-consolidating concrete. First North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, ACBM Center : 349{354.
- [21] Fares, H. (2009). Propriétés mécaniques et physico-chimiques de Bétons autoplaçants exposés à une température élevée. Thèse de doctorat, Université de Cergy Pontoise.
- [22] De Larrard, F. (1999). Concrete mixture-proportioning - A scientific approach . Modern Concrete Technology Series, N°9, E&FN SPON.
- [23] Pera, J., Husson, S., Guilhot, B. (1999). Influence of finely ground limestone on cement hydration. Cement and Concrete Composites, pp. 99-105.
- [24] Pineaud, A. (2007). Contribution à l'étude des caractéristiques mécaniques des bétons autoplaçants et application à l'industrie de la préfabrication. Thèse de doctorat, Université de Cergy-Pontoise.
- [25] Turcry, P., Rozière, E., Loukili, A. (2005). Influence du volume de pâte et des additions sur le retrait de fissuration des bétons autoplaçants. XXII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie-Civil, Grenoble.
- [26] Eurocode 2 (Octobre 2005). Calcul des structures en béton - partie 1-2 : Règles générales, calcul du comportement au feu. AFNOR, NF EN 1992-1-2.
- [27] Persson, B.(2001). A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. Cement and Concrete

Research, Vol. 31, no 2 :193{198.

- [28] Pons, G., Proust, E., Assié, S. (2003). Creep and shrinkage of self-compacting concrete: a different behaviour compared with vibrated concrete. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland : 645{654.
- [29] Klug, Y., Holschemacher, K. (2003). Comparison of the hardened properties of selfcompacting concrete and normal vibrated concrete. Proceeding of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (Pro 33), Reykjavik, Iceland: 596{607.
- [30] Serifou, M. (2013). Béton à base de recyclats : influence du type de recyclats et rôle de la formulation. Thèse de doctorat, Université Felix Houphouët Boigny et Université Bordeaux 1, France.
- [31] Meftah, H., Arabi, N. (2011). Les granulats recyclés humidifiés : comportements des bétons frais et durcis. XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil, Tlemcen, 29 au 31 Mai.
- [32] Blessen, S.T. (2016). Strength and durability of concrete containing discarded crumb rubber tire. Thèse de doctorat, Malaviya National Institute of Technology, Jaipur, India.
- [33] HO Anh Cuong, M. (2010). Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, France.
- [34] Ramdani, S. (2019). Performance behavior of concrete made with waste rubber aggregates from grinding used tires and glass waste. Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, Algeria.
- [35] Boukour, S. (2017). Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés. Thèse de doctorat, Université du 08 Mai 1945, Guelma, Algeria.
- [36] Eldin, N.N., Senouci, A.B. (1992). Engineering properties of rubberized concrete. Canadian Journal of Civil Engineering, 19, 912-923.
- [37] Eldin, N.N., Senouci, A.B. (1993). Rubber tire particles as concrete aggregate. Journal of Material in Civil Engineering, 5(4): 478-496.
- [38] Nurazuwa, B. N. (2014). Physical performance and durability evaluation of rubberized concrete. Thèse de doctorat, Kyushu University, Fukuoka, Japan.

- [39] Dong, Q., Huang, B., Shu, X. (2013). Rubber modified concrete improved by chemically active coating and silane coupling agent. *Construction and Building Materials* 48, 116–123.
- [40] Li, G., Stubblefield, M.A., Garrick, G., Eggers, J., Abadie, C., Huang, B. (2004). Development of waste tire modified concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(12): 2283-2289.20
- [41] Toutanji, H.A. (1996). The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 18(2): 135-139.
- [42] Zheng, L., Sharon Huo, X., Yuan, Y. (2008). Experimental investigation on dynamic properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 22, 939–947
- [43] Al-Akhras, N.M., Samadi, M.M. (2004). Properties of tire rubber ash mortar. *Cement and Concrete Composites*, 26(7): 821-826.
- [44] Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezreb, K., Labbani, F., Roucoult, J.M. (2008). Effet des granulats de caoutchouc sur les propriétés d'un mortier de ciment. XIV Colloque National de la Recherche dans les IUT (CNRIUT). Université Claude Bernard Lyon1. France. 29 et 30 mai, 1-9.
- [45] Oikonomou, N., Mavridou, S. (2009). Improvement of chloride ion penetration resistance in cement mortars modified with rubber from worn automobile tires. *Cement & Concrete Composites* 31, 403–407.
- [46] Turatsinze, A., Bonnet, S., Granju, J.L. (2005). Mechanical characterization of cement-based mortar incorporating rubber aggregates from recycled worn tyres. *Building and Environment*, 40(2): 221-226.
- [47] Balaha, M.M., Badawy, A.A.M., Hashish, M. (2007). Effect of using ground tire rubber as fine aggregate on the behaviour of concrete mixes. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS)*, 14(6): 427-435.
- [48] Ghaly, A.M., Cahill, J.D. (2005). Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. *Can. J. Civ. Eng.* 32: 1075–1081.
- [49] Issa, C.A., Salem, G. (2013). Utilization of recycled crumb rubber as fine aggregates in concrete mix design. *Construction and Building Materials*, 42, 48-52.
- [50] Li, L., Ruan, S., Zeng, L. (2014). Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles. *Construction and Building Materials*, 70, 291–308.

- [51] Liu, F., Zheng, W., Li, Lijuan., Feng, W., Ning, G. (2013). Mechanical and fatigue performance of rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 47: 711–719.
- [52] Pelisser, F., Zavarise, N., Longo, T.A., Bernardin, A.M. (2011). Concrete made with recycled tire rubber: Effect of alkaline activation and silica fume addition. *Journal of Cleaner Production*, 19(6-7): 757-763.
- [53] Sukontasukkul, P., Tiamlom, K. (2012). Expansion under water and drying shrinkage of rubberized concrete mixed with crumb rubber with different size. *Construction and Building Materials*, 29, 520-526.
- [54] Su, H., Yang, J., Ling, T., Ghataora, G.S., Dirar, S. (2015). Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, 91, 288-296.
- [55] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Mehra, P., Kumar, S. (2015). Performance of high strength rubberized concrete in aggressive Environment. *Construction and Building Materials*, 83, 320-326.
- [56] Thomas, B.S., Gupta, R.C., Panicker, V.J. (2016). Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, 112: 504-513.
- [57] Bignozzi, M.C., Sandrolini, F. (2006). Tyre rubber waste recycling in self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 36(4): 735-739.
- [58] Gesoğlu, M., Güneyisi, E. (2011). Permeability properties of self-compacting rubberized concretes. *Construction and Building Materials*, 25(8): 3319-3326.
- [59] Yung, W.H., Yung, L.C., Hua, L.H. (2013). A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 665-672.
- [60] Atahan, A.O., Yücel, A.Ö. (2012).Crumb rubber in concrete: static and dynamic evaluation. *Construction and Building Materials*, 36, 617-622.
- [61] Fattuhi, N. I., Clark, L. A. (1996). Cement-based materials containing shredded scrap truck tyre rubber. *Construction and Building Materials*, Vol. 10, No. 4, pp. 229-236.
- [62] Gargouri, A., Daoud, A. (2017). Valorisation des granulats de caoutchouc dans le béton autoplaçant. Conf 6 : Valorisation des déchets de pneus dans le béton, Du 08 au 11 Mars, Sfax - Tunisie.
- [63] Güneyisi, E., Gesoglu, M., Oturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(12): 2309-2317.

- [64] Khaloo, A.R., Dehestani, M., Rahmatabadi, P. (2008). Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire-rubber particles. *Waste Management*, 28(12): 2472-2482.
- [65] Khatib, Z.K., Bayomy, F.M. (1999). Rubberized Portland cement concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 11(3): 206-213.
- [66] Nadjim, K.B., Hall, M.R. (2012). Mechanical and dynamic properties of self-compacting crumb rubber modified concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1): 521-530.
- [67] Topçu, I.B. (1995). The properties of rubberized concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(2): 304-310.
- [68] Valadares, F., Bravo, M., Brito, J. (2012). Concrete with Used Tire Rubber Aggregates: Mechanical Performance. *Aci Materials Journal*, 109(3):283-292.
- [69] Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Quéneudec, M. (2006). Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste. *Cement and Concrete Composites*, 28(7): 650-657.
- [70] Benazzouk, A., Douzane, O., Quéneudec, M. (2006). Valorisation de déchets de caoutchouc dans les matériaux de construction : cas d'un composite cimentaire cellulaire. *Déchets sciences et techniques*, N°41, p. 30-35.
- [71] Benazzouk, A., Douzane, O., Langlet, T., Mezzeb, K., Roucoult, J.M., Quéneudec, M. (2007). Physico mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. *Cement and Concrete Composites*, 29(10): 732-740.
- [72] Fedroff, D., Ahmad, S., Savas, B. (1996). Mechanical properties of concrete with ground waste tire rubber. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1532, 66-72.
- [73] Ganjian, E., Khorami, M., Maghsoudi, A.A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5): 1828-1836.
- [74] Chylík, R., Trtík, T., Fládr, J., Bílý, P. (2017). Mechanical properties and durability of crumb rubber concrete. *Materials Science and Engineering*, 236, 012093.
- [75] Gesoglu, M., Guneyisi, E. (2007). Strength development and chloride penetration in rubberized concretes with and without silica fume. *Materials and Structures*, 40(9): 953-964.

- [76] Mavroulidou, M., Figueiredo, J. (2010). Discarded tyre rubber as concrete aggregate : A possible outlet for used tyres. *Global Nest Journal*, 12(4): 359-367.
- [77] Haddad, O., Hacid, L., Aggoun, S., Kaci, S. (2016). Effet des granulats en caoutchouc sur les propriétés des matériaux cimentaires. *Journal of Materials, Processes and Environment*, December edition, Vol.4. No2.
- [78] Zaoiai, S., Makani, A., Tafraoui, A., Benmerioul, F. (2016). Optimization and mechanical characterization of self- compacting concrete incorporating rubber aggregates. *Asian Journal Of Civil Engineering (Bhrc)* Vol. 17, No. 6, Pages 817-829.
- [79] El-Gammal, A., Abdel-Gawad, A.K., El-Sherbini, Y., Shalaby, A. (2010). Compressive strength of concrete utilizing waste tire rubber. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences (JETEAS)*, 1(1): 96-99.
- [80] Aiello, M.A., Leuzzi, F. (2010). Waste tire rubberized concrete: Properties at fresh and hardened state. *Waste Management*, 30(8): 1696-1704.
- [81] Bravo, M., De Brito, J. (2012). Concrete made with used tyre aggregate: Durability related performance. *Journal of Cleaner Production*, 25, 42-50.
- [82] Siddique, R., Naik, T.R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber—an overview. *Waste Management*, 24(6): 563-569.
- [83] Ollivier, J.P., Vichot, A. (2008). La durabilité des bétons : Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [84] Baghdadi, N. (2008). Modélisation du couplage chimico-mécanique d'un béton atteint d'une réaction sulfatique interne. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [85] Swenson, E. G. (1974). Le béton en milieux sulfatés, *Digeste de la Construction au Canada*.
- [86] Altération du béton en site maritime (2011). Centre d'Etude Technique Maritimes Et Fluviales, France, Octobre.
- [87] Stanish, K.D., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. (1997). Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review , University of Toronto, Canada.
- [88] Guidebook on non-destructive testing of concrete structures (2002). International Atomic Energy Agency, Vienna.

- [89] Non-destructive Testing (1999). A Guidebook for Industrial Management and Quality Control Personnel, International Atomic Energy Agency, Training Course Series No. 9, Vienna.
- [90] Davis, A. G., Chairman. (1998). Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, American Concrete Institute.
- [91] Maierhofer, C., Reinhardt ,H.W., Dobmann, G. (2010). Non-destructive evaluation of reinforced concrete structures, Non-destructive testing methods- Volume 2. Woodhead Publishing Limited.
- [92] Malhotra, V.M., Carino, N.J (2004). Handbook on non-destructive testing of concrete, second edition. ASTM International standards.
- [93] Truong S. B. (2014). Caractérisation et modélisation de l'endommagement des géomatériaux par méthode ultrasonore. Thèse de Doctorat, université d'orléans.
- [94] Chen, A. (2013). Development of rapid assessment tools For structural members using Ultrasonic stress wave techniques. Thèse de Master , University of Delaware.
- [95] Ploix, M.A. (2006). Etude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique. Thèse de Doctorat, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- [96] Redouane, D. (2005). Techniques de traitement des signaux ultrasonores appliquées au contrôle non destructif des matériaux. Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, USTHB – Alger.
- [97] Komlos K., Popovics S., Nurnbergerova T., Babal B., Popovics J.S. (1996). Ultrasonic pulse velocity test of concrete properties as specified in various standards. Cem.Concr. Composites, 18, 357.
- [98] Larcher, N. (2014). Contribution à la caractérisation des matériaux au comportement viscoélastique par méthode ultrasonore, Application aux matériaux bitumineux. Thèse de Doctorat, Université De Limoges.
- [99] Garnier, V., Chaix, J. F., Rossat, M., Payan, C., Corneloup, G. (2009). Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores. 19ème Congrès Français de Mécanique Marseille, 24-28 août .
- [100] Boyd, A. J., Birgisson, B., Ferraro, C., Cumming, S. (2005). Nondestructive Testing for Advanced Monitoring and Evaluation of Damage in Concrete Materials. Final Report, University of Florida.

- [101] ASTM (2001d). Standard Test for the Pulse Velocity Through Concrete, C597-97. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [102] Bogas, J.A., Gomes, M.G, Gomes, A. (2013). Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Ultrasonics* 53 , 962–972.
- [103] Albano, C., Camacho, N., Reyes, J., Feliu, J.L., Hernández, M. (2005). Influence of scrap rubber addition to Portland I concrete composites: Destructive and non-destructive testing. *Composite Structures* 71, 439–446.
- [104] Philippidis, T.P., Aggelis, D.G. (2005). Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. *Ultrasonics* 43 , 584–595.
- [105] Abo-Qudais, S.A. (2005). Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. *Construction and Building Materials* 19 : 257–263.
- [106] Berriman, J., Purnel, P., Hutchin, D.A., Neil, A. (2005). Humidity and aggregate content correction factors for air-coupled ultrasonic evaluation of concrete. *Ultrasonics*, Vol. 43, pp. 211–217.
- [107] Jacob, L.J., Owin, J.O. (2000). Effect of aggregate size on attenuation of Rayleigh Surface waves in cement-based materials. *J. Eng. Mech*, 126,1124-1130.
- [108] Jones, R. (1954). Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique. RILEM int. symp. Nondestructive Testing of Materials and Structures, paris, vol. 1, paper n° A17, janvier.
- [109] Panzera, T. H., Christoforo, A. L., Cota, F. P., Borges, P. H. R., Bowen, C. R. (2011). Ultrasonic Pulse Velocity Evaluation of Cementitious Materials. *Advances in Composite Materials - Analysis of Natural and Man-Made Materials*.
- [110] Solis-Carcaño, R., Moreno, E.I. (2008). Evaluation of concrete made with crushed limestone aggregate based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials* 22,1225–1231.
- [111] Trtnik, G., Kavčič ,F., Turk, G. (2009). Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics* 49, 53–60.
- [112] Kaplan, M. F. (1959). The effects of age and water/cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 11, No. 32: July.
- [113] Philippidis, T.P., Aggelis, D.G. (2003). An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. *Cement and Concrete Research* 33,

525–538.

- [114] Rìo, L.M.del., Jiménez, A., Lòpez, F., Rosa, F.J., Rufo, M.M., Paniagua, J.M. (2004). Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing. *Ultrasonics* 42, 527–530.
- [115] Wang, Y., Hu, H.X., Liu, S.J., Chen, S.J., Xu, Z.Z. (2017). The Effect of Water-Cement Ratio on Acousto-Ultrasonic Characteristics in Mortar. ISSN 1061-8309, *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 53, No. 2, pp. 148–158.
- [116] Hannachi, S. (2015). Evaluation de la résistance a la compression du béton sur site : application de la méthode combinée. Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie.
- [117] Demirboga, R., Türkmen, I., Karakoc, M.B. (2004). Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixed concrete. *Cement and Concrete Research* 34, 2329–2336.
- [118] Rao, S.K., Sravana, P., Rao, T.C. (2016). Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of Roller compacted concrete pavement containing Fly Ash and M-sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*.
- [119] Benaïcha, M., Jalbaud, O., Hafidi Alaoui, A., Burtschell, Y. (2015). Correlation between the mechanical behavior and the ultrasonic velocity of fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 101, 702–709.
- [120] Bureau of Indian Standards (1992). Non-destructive testing of concrete - Methods of test, part 1 ultrasonic pulse velocity. IS 13311-1.
- [121] Fnine, A. (2006). Auscultation de la peau du béton par ondes ultrasonores haute fréquence. Thèse de Doctorat, Université Des Sciences Et Technologies De Lille, France.
- [122] Ohdaira, E., Masuzawa, N. (2000). Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete -the possibility of NDE. *Ultrasonics* 38, 546–552.
- [123] Kmack, R. M. (2008). Characterization of air voids in fresh cement paste through ultrasonic nondestructive testing, Master's thesis, Georgia Institute of Technology.
- [124] Punurai, W., Jarzynski, J., Qu, J., Kurtis, K.E., Jacobs, L.j. (2006). Characterization of entrained air voids in cement paste with scattered ultrasound. *NDT&E International* 39, 514-524.
- [125] Zhu, J., Kee, S.H., Han, D., Tsai, Y.T. (2011). Effects of air voids on ultrasonic wave propagation in early age cement pastes. *Cement and Concrete Research* 41, 872–881.

- [126] RILEM (1972). Recommendations NDT, testing of concrete by the ultrasonic pulse method, Paris.
- [127] Benouis, A., Grini, A. (2011). Estimation of concrete's porosity by ultrasounds. *Physics Procedia* 21, 53 – 58.
- [128] Mehamdia, A., Benouis, A.H. (2018). Influence of the size and frequency of contact transducers on the determination of concrete permeability by ultrasonic velocity and attenuation. *J. Mater. Environ. Sci.*, Volume 9, Issue 3, Page 730-740.
- [129] Azreen, M.N., Pauzi, I.M., Nasharuddin, I., Haniza, M.M., Akasyah, J., Karsono, A.D., Yen Lei, V. (2016). Prediction of concrete compression strength using ultrasonic pulse velocity. *American Institute of Physics*.
- [130] Belaribi, H., Mellas, Mr. (2013). Assessing quality polypropylene fiber concrete by ultrasonic method. 21ème Congrès Français de Mécanique Bordeaux, 26 au 30 août.
- [131] Panzera, T. H., Rubio, J. C., Bowen, C. R., Vasconcelos, W. L., Strecker, K. (2008). Correlation between structure and pulse velocity of cementitious composites. *Advances in Cement Research*, Vol. 20, No. 3, July, pp. 101–108.
- [132] Qasrawi, Y.H. (2000). Concrete strength by combined non-destructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 739–746.
- [133] Turgut, P., Kucuk, O. F. (2006). Comparative relationships of direct, indirect, and semi-direct ultrasonic pulse velocity measurements in concrete. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, Vol. 42, No. 11, pp. 745–751.
- [134] Zarandi, M.H. F., Turksen, I.B., Sobhan, J., Ramezani pour, A.A. (2008). Fuzzy polynomial neural networks for approximation of the compressive strength of concrete. *Applied Soft Computing*, Vol. 8, No. 1, pp. 488–498.
- [135] Goueygou, M., Lafhaj, Z., Kaczmarek, M. (2003). Relationship between porosity, permeability and ultrasonic parameters in sound and damaged mortar. *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*.
- [136] Goueygou, M., Lafhaj, Z., Soltani, F. (2009). Assessment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves. *NDT&E International* 42, 353–360.
- [137] Haddad, K., Haddad, O., Aggoun, S., Kaci, S. (2017). Correlation between the porosity and ultrasonic pulse velocity of recycled aggregate concrete at different saturation levels. *Can. J. Civ. Eng.*
- [138] Hernández, M.G., Izquierdo, M.A.G., Ibáñez, A., Anaya, J.J., Ullate, L.G. (2000). Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. *Ultrasonics* 38, 531–533.

- [139] Lafhaj, Z., Goueygou, M., Djerbi, A., Kaczmarek, M. (2006). Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water / cement ratio and water content. *Cement and Concrete Research* 36, 625 – 633.
- [140] Punurai, W., Jarzynski, J., Qu, J., Kim, J.Y., Jacobs, L.j., Kurtis, K.E. (2007). Characterization of multi-scale porosity in cement paste by advanced ultrasonic techniques. *Cement and Concrete Research* 37, 38–46.
- [141] Soltani, F., Goueygou, M., Lafhaj, Z., Piwakowski, B. (2013). Relationship between ultrasonic Rayleigh wave propagation and capillary porosity in cement paste with variable water content. *NDT&E International* 54, 75–83.
- [142] Vergara, L., Miralles, R., Gosàlbez, J., Juanes, F.J., Ullate, L.G., Anaya, J.J., Hernández, M.G, Izquierdo, M.A.G. (2001). NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar. *NDT&E International* 34, 337–362.
- [143] Aggelis, D.G., Shiotani, T. (2007). Experimental study of surface wave propagation in strongly heterogeneous media. *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (5), November.
- [144] Aggelis, D.G., Shiotani, T. (2008). Surface wave dispersion in cement-based media: Inclusion size effect. *NDT&E International* 41, 319–325.
- [145] Aggelis, D.G., Shiotani, T. (2008). Effect of Inhomogeneity Parameters on Wave Propagation in Cementitious Material. *ACI Materials Journal* / March-April.
- [146] Aggelis, D.G. , Kordatos, E.Z., Soulioti D.V., Matikas T.E. (2010). Combined use of thermography and ultrasound for the characterization of subsurface cracks in concrete. *Construction and Building Materials* 24, 1888–1897.
- [147] Aggelis, D.G., Chai, H. K., Shiotani, T. (2012). Elastic Waves on Large Concrete Surfaces for Assessment of Deterioration and Repair Efficiency. *Nondestructive Testing Methods and New Applications*.
- [148] Benaicha, M., Jalbaud, O., Roguiez, X., Hafidi Alaou, A., Burtshell, Y. (2015). Prediction of Self-Compacting Concrete homogeneity by ultrasonic velocity. *Alexandria Engineering Journal* 54, 1181–1191.
- [149] Hager, I., Carré, H., Krzemień, K. (2013). Damage assessment of concrete subjected to high temperature by means of the ultrasonic pulse velocity – UPV method. *Studies And Researches – V.32* ,Graduate School in Concrete Structures – Fratelli Pesenti ,Politecnico di Milano, Italy, January.
- [150] Ham, S., Song, H., Oelze, M.L., Popovics, J.S. (2016). A contactless ultrasonic surface wave approach to characterize distributed cracking damage in concrete. *Ultrasonics*.

- [151] Hwang, E., Kim, G., Choe, G., Yoon, M., Gucunski, N., Nam, J. (2018). Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials* 171, 511–520.
- [152] Ould Naffa, S., Goueygou, M., Piwakowski, B., Buyle-Bodin, F. (2002). Detection of chemical damage in concrete using ultrasound. *Ultrasonics* 40, 247–251.
- [153] Petro, Jr J.T., Kim, J. (2012). Detection of delamination in concrete using ultrasonic pulse velocity test. *Construction and Building Materials* 26, 574–582.
- [154] Quiviger, A., Payan, C., Chaix, J.-F., Garnier, V., Salin, J. (2012). Effect of the presence and size of a real macro-crack on diffuse ultrasound in concrete. *NDT&E International* 45, 128–132.
- [155] Santhanam, M. (2010). *Ultrasonic Characterization of Damage in Concrete*. Tech Science Press, SL, vol.3, no.2, pp.111-125.
- [156] Smolarkiewicz, P.P, Nogueira, C.L., Willam, K.J. (2000). Ultrasonic evaluation of damage in heterogeneous concrete materials. *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona, 11-14 September.
- [157] Yang, H., Lin, Y., Hsiao, C., Liu, J.Y. (2009). Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. *Fire Safety Journal* 44, 121– 130.
- [158] Yim, H.J., Kim, J.H., Park, S.J., Kwak, H.G. (2012). Characterization of thermally damaged concrete using a nonlinear ultrasonic method. *Cement and Concrete Research* 42, 1438–1446.
- [159] NF EN 934-2(Août 2009). Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Partie 2 : adjuvants pour bétons - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage.
- [160] NF EN 12350-2 (Avril 2012). Essais pour béton frais - Partie 2 : essai d'affaissement.
- [161] NF EN 12350-7 (Avril 2012). Essais pour béton frais, Partie 7 : Teneur en air — Méthode de la compressibilité.
- [162] [http: doc.lerm.fr/ salinité-l'eau-mer](http://doc.lerm.fr/salinité-l'eau-mer), consulté le 18-10-2016.
- [163] EN 12504-4 (2004). Testing concrete - Part 4: Determination of pulse velocity. European Committee for Standardization CEN.
- [164] NF EN 12390-3 (Février 2003). Essai pour béton durci - Partie 3 : résistance a la compression des éprouvettes. *AFNOR*.
- [165] NF EN 12390-5 (Octobre 2001). Essai pour béton durci - Partie 5 : Resistance a la flexion des éprouvettes. *AFNOR*.

- [166] NF P18-459 (Mars 2010). Béton - Essai pour béton durci - Essai de porosité et de masse volumique.
- [167] Garros, M. (2007). Composites cimentaires incorporant des granulats caoutchouc issus du broyage de pneus usagés : optimisation de la composition et caractérisation. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse.
- [168] Naik, T.R., Siddique, R. (2002). Properties of concrete containing scrap tire rubber- An overview. Report No. CBU-2002-06, REP-459.
- [169] Boudjedra, F., Benouis, A., Boudaoud, Z. (2020). Estimation of rubber waste concrete properties by ultrasonic velocities: effect of transducers' diameters and frequencies. *Civil And Environmental Engineering Reports*, 30 (2): 0200-0220.
- [170] Nagarajan, C., Shanumugasundaram, P., Anmeeganathan, S. R. (2019). Properties of high strength concrete containing surface-modified crumb rubber, *GRAĐEVINAR* 71-7, 579-588, DOI: <https://doi.org/10.14256/JCE.2312.2018>
- [171] Karahan, O., Özbay, E., Hossain, K.M.A., Lachemi, M., Atis, C.D. (2012). Fresh, mechanical, transport, and durability properties of self-consolidating rubberized concrete. *ACI Materials Journal*, 109(4): 413-420.
- [172] Onuaguluchi, O., Panesar, D.K. (2014). Hardened properties of concrete mixtures containing pre-coated crumb rubber and silica fume. *Journal of Cleaner Production*, 82, 125–131.
- [173] Xu, J., Chen, S., Yu, H., Wang, Y. (2015). Crumb rubber concrete deterioration caused by sulphate attack. 3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015), 539-542.
- [174] Rao, K.J., Mujeeb, M.A. (2015). A study on properties of crumb rubber concrete by destructive and non-destructive testing. *Asian Journal of Civil Engineering (BHRC)*, VOL. 16, NO. 7, PAGES 933-941.
- [175] Thomas, B.S. (2012). Strength and durability of concrete containing discarded crumb rubber tire. This thesis is submitted as a partial fulfillment of the degree of Doctor of Philosophy. Malaviya National Institute of Technology. Jaipur, India.
- [176] Shariq, M., Prasad, J., Masood, A. (2013). Studies in ultrasonic pulse velocity of concrete containing GGBFS. *Construction and Building Materials*, 40, 944–950.

ANNEXES



فكش تديريلنا راجع دوريلنا
FICHE TECHNIQUE CIMENT

F03-01/1000

Date : 21/06/2000

Version : 00

Page 4 sur 4

CIMENT PORTLAND COMPOSE CPJ-CEMII/A 42,5

MARS 2011

CARACTERISTIQUE CHIMIQUE		CARACTERISTIQUE PHYSIQUE			CARACTERISTIQUE MECANIQUE	
ELEMENTS	% EN MASSE	NORME NA			NORME NA	EN MPa
PAF 975 °C	1 - 2	NA230	CONSISTANCE NORMALE	≥ 25	NA 442	COMPRESSION
CaO	55 - 63	NA230	DEBUT DE PRISE	≤ 60		02 jours ≥ 12,50
SiO2	22 - 28	NA230	FIN DE PRISE	150 - 250		07 jours 25 - 35
Al2O3	5 - 6	NA232	EXPANSION A CHAUD	≤ 10mm		28 jours 42,5 - 52,5
Fe2O3	3 - 3,6	NA231	SSBlaine cm ² /g	3300 - 4000	NA 234	FLEXION
MgO	1 - 2	NA231				02 jours 3,0 - 4,0
K2O	0,3 - 0,6					07 jours 5,0 - 6,5
Na2O	0,1 - 0,16	NA440	RETRAIT SUR MORTIER μm/m	≤ 1000		28 jours 6,5 - 8,5
SO3	1,8 - 2,5	COPOSITION POTENTIELLE EN %		% DES CONSTITUANTS		
CaOL	0,8 - 1,8	C3S	55 - 65	CLINKER	≥ 74	
CL ⁻	0 - 0,01	C2S	10 - 25	GYPSE	4 - 6	
		C3A	8 - 12	CALCAIRE	0	
		C4AF	9 - 13	LATIER	≤ 20	

DOMAINE D'UTILISATION

Utilisation courante de notre ciment :

- Fondations (béton de propreté et béton de semelle en milieux non agressifs).
- Ouvrage en béton armé (Murs, Linteaux, Poteaux et dalle de compressions).
- Dallage en béton, Montage de mure et maçonnerie et Scellements de carrelage (Dalles, pierres et carrelage)
- Chape (mortier de ciment)

PRECAUTION D'EMPLOI

Ce type de ciment ne convient pas pour :

- Ouvrages en milieux agressifs (terrains acides, sulfates, eaux industriels) emploi obligatoire de ciment

ES pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates.

- Travaux à la mère (emploi obligatoire de ciment PM pour travaux à la mer).
- Bétonnage au dessous de 5° C (Il est conseillé d'utiliser des ciments de résistance initiale élevée R)

STOCKAGE :

Eviter :

- Un stockage prolongé au-delà de trois (03) mois.
- Un stockage dans des endroits humides.

EMBALLAGE :

- Le ciment est emballé dans des sacs en papier kraft à 02 plis, le système de fermeture garantie l'inviolabilité du

ATTENTION

- Un contact prolongé du ciment avec la peau peut être irritant.

S.O.M.S.
Cimenterie de HADJAR-SOUD
DEPT. DE SERVICE CONTRÔLE QUALITE



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 ₃	98%
CaO	56,03%
SiO ₂	0,04%
Na ₂ O	0,05%
MgO	0,17%
Al ₂ O ₃	0,03%
Fe ₂ O ₃	0,02%
K ₂ O	0,02%
P ₂ O ₅	0,008%
TiO ₂	0,009%
Chlorure	0,0033%
SO ₃ (soluble dans l'eau)	0,0021%
SO ₃ (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

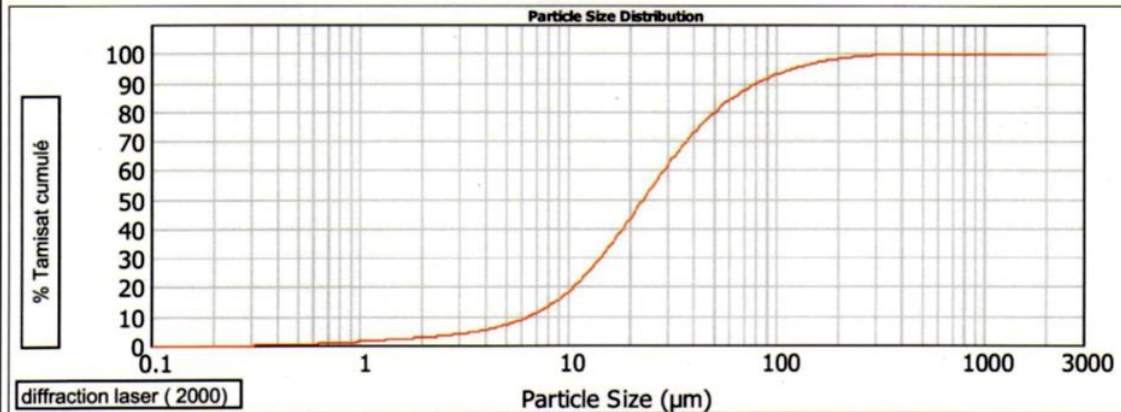
Masse volumique réelle:	2,7
Masse volumique en vrac	1.11gr/cm ³
Valeur de bleu de méthylène MB ₁	1.67gr/kg

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)

MEDAPLAST SP 40

Conforme à la norme EN 934-2 Tab 1, 3.1 et 3.2, NA 774

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.

DOMAINES D'APPLICATION

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

PROPRIÉTÉS

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

Sur béton frais :

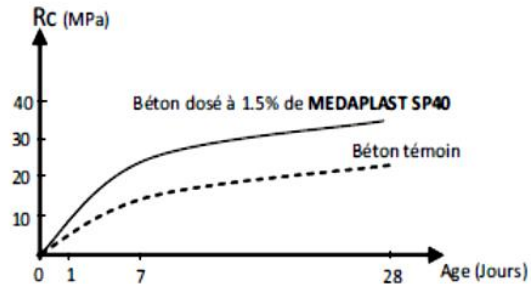
- Améliorer la fluidité
- Augmenter la maniabilité
- Réduire l'eau de gâchage
- Éviter la ségrégation
- faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Augmenter les résistances mécaniques même à jeune âge
- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait

CARACTÉRISTIQUES

• Aspect	Liquide
• Couleur	Marron
• pH	8,2
• Densité	1,20 ± 0,01
• Teneur en chlore	< 1g/L
• Extrait sec	40%



Evolution des résistances en compression

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.

DOSAGE

Plage de dosage recommandée :

0,6% à 2,5% du poids de ciment soit 0,5L à 2L pour 100 kg de ciment

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

CONDITIONNEMENT ET STOCKAGE

Le **MEDAPLAST SP 40** est conditionné en bidons de 12Kg, fûts de 270 kg et cubitenaire de 1200 kg.

Délai de conservation :

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

PRÉCAUTIONS D'EMPLOI

Manipulation non dangereuse.

Se référer à la Fiche de Données de Sécurité disponible sur : www.granitex-dz.com

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 convenue pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

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.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com

