

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de 8 Mai 1945 Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : DIALLO Rokia

OUMEDDOUR Alla-Eddine

Thème

Contribution à l'auscultation et la caractérisation non destructive du béton

Sous la direction de : Pr. BENOUIS A.

Juin 2020

Remerciements

Gloire et louange à Allah le très miséricordieux de nous avoir donné la force, le courage, la santé et ainsi que la volonté pour mener à terme ce mémoire de fin d'études de master deux option structures.

*Nous tenons à remercier très sincèrement et avec gratitude notre encadreur **Mr. le Pr. BENOUIS Abdelhalim** à qui nous devons beaucoup pour son encadrement, sa patience, son humanité et sa pédagogie. Merci pour le temps précieux que vous nous avez accordé, cela a été un réel plaisir de travailler avec vous, puisse ALLAH vous accorder santé, longévité ainsi que la joie de vivre.*

Nos vifs remerciements aux membres du jury qui nous font l'honneur d'examiner ce modeste travail tout en apportant leurs propositions.

Nos remerciements les plus profonds à nos très chers parents, pour leurs soutiens et leurs encouragements. Nous espérons un jour être à la hauteur de vos attentes.

Un grand merci à l'ensemble du corps enseignant et administratif du département de génie civil et d'hydraulique de la faculté des sciences et de la technologie de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, ainsi qu'à nos collègues de la promotion 2015-2020, pour les bons moments partagés.

Merci à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce mémoire

*À mon très cher papa, l'homme de ma vie ***Bakary***, mon soutien moral, matériel et financier, celui qui s'est toujours sacrifié pour l'ensemble de ses enfants et qui n'a ménagé aucun effort pour notre réussite. Les mots me manquent pour qualifier la moralité et le sens de responsabilité qui sont en toi. J'espère, que tu seras fier de moi, Papa ! Qu'ALLAH t'accorde la longévité, la santé ainsi que la joie de vivre.*

*À celle qui m'a donné la vie, ma meilleure amie, ***Aminata***, une femme affable, extraordinaire et exceptionnelle ; celle qui m'a ouvert les yeux sur le monde et qui me donne confiance en moi pour chaque étape de ma vie. Maman, tu es mon réconfort, ma certitude, je ne pourrais jamais te remercier assez. Qu'ALLAH le tout miséricordieux te garde longtemps en vie.*

*À ma grande sœur ***Kadidiatou***, merci d'apaiser mes pleurs peu importe la situation ; tu as toujours les mots qu'il faut et tu sais reconnaître les moments où j'ai simplement besoin d'une oreille attentive pour m'écouter.*

À mes petites sœurs et petits frères, je vous aime tellement.

À ma grand-mère, mes oncles, mes tantes, je mets entre vos mains, le fruit de longs mois de distance, et de longs jours d'apprentissage.

À tous mes amis qui de près ou de loin n'ont jamais cessé de croire en moi et m'ont donné envie d'aller de l'avant.

À tous ceux que j'aime, sans vous je n'y serai jamais arrivée.

À mon collègue du projet, enfin nous y sommes !

Rokia

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles, qui ont été à mes côtés et qui m'ont toujours soutenu.

À mes sœurs, et mon petit frère.

À toute ma famille oumeddour et richi.

À l'ensemble de mes amis, et ma collègue dans ce travail.

À ma chère docteure : khechaimia M.

Enfin à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.

Oumeddour Ala-eddine

ملخص

تتعرض الهياكل الخرسانية المسلحة للعديد من الهجمات الفيزيائية والكيميائية التي يمكن أن تقلل من عمرها، مما يؤدي إلى تآكل التعزيزات وكذلك التصدع. إن قدرة الخرسانة على مقاومة هذه الهجمات الخارجية مشروطة بخصائص النقل (المسامية، النفاذية) بالإضافة إلى قوتها الانضغاطية. الطريقة المعيارية للتوصيف المستخدمة لتقييم خصائص الخرسانة هي طريقة مدمرة لها العديد من العيوب بسبب حقيقة أن النتائج غير متاحة على الفور، قد تكون خرسانة العينات مختلفة عن تلك الخاصة بالهيكل؛ إنه طويل ويصعب تحقيقه في كثير من الأحيان.

في هذا البحث النهائي، نقترح أن ندرس، من خلال البحث الببليوغرافي المفصل، تسمع الهياكل الخرسانية باستخدام الموجات فوق الصوتية. يراقب التسمع الصوتي جودة الخرسانة لتحديد عدم التجانس والانقطاع في الهياكل الخرسانية، ويقيس سمك الأجزاء الخرسانية. يمكن استخدامه أيضًا لتحديد معاملات المرونة أو نسبة بواسون للخرسانة الإنشائية. يعتمد اختبار الموجات فوق الصوتية على إرسال وانعكاس وامتصاص الموجات فوق الصوتية داخل المادة المراد اختبارها.

الكلمات الرئيسية: الخرسانة، الاختبار غير المتلف، الأمراض، الموجات فوق الصوتية، الارتباط.

RÉSUMÉ

Les structures en béton armé sont soumises à de nombreuses attaques physico-chimiques qui peuvent réduire leurs durées de vie, ce qui conduit à la corrosion des armatures, ainsi qu'à la fissuration. L'aptitude du béton à résister à ces attaques externes est conditionnée par ses propriétés de transfert (porosité, perméabilité) ainsi qu'à sa résistance à la compression. La méthode standard de caractérisation utilisée pour évaluer les propriétés du béton est une méthode destructive qui a beaucoup d'inconvénients provenant du fait que les résultats ne sont pas immédiatement disponibles, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage ; elle est longue et souvent difficile à réaliser.

Dans ce travail de mémoire de fin d'études, nous proposons d'étudier à travers une recherche bibliographique détaillée, l'auscultation des structures en béton par l'utilisation des ondes ultrasoniques. L'auscultation sonore permet de contrôler la qualité du béton afin de déterminer des hétérogénéités et des discontinuités dans les structures en béton, et mesure l'épaisseur de pièces en béton. Elle peut être également utilisée pour déterminer le module d'élasticité ou le coefficient de poisson des bétons de structures. Le contrôle par ultrason est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'onde ultrasonore à l'intérieur du matériau à contrôler.

MOTS CLÉS : Béton, contrôle non destructif, pathologies, ondes ultrasoniques, corrélation.

ABSTRACT

Reinforced concrete structures are subjected to numerous physicochemical attacks that can shorten their lifespans, which leads to corrosion of the reinforcements, as well as to cracking. The ability of concrete to resist these external attacks is conditioned by its transfer properties (porosity, permeability) as well as its compressive strength. The standard method of characterization used to evaluate the properties of concrete is a destructive method which has many drawbacks due to the fact that the results are not immediately available, the concrete of the specimens may be different from that of the structure ; it is long and often difficult to achieve.

In this final thesis work, we propose to study, through detailed bibliographic research, the auscultation of concrete structures by the use of ultrasonic waves. Sonic auscultation monitors the quality of concrete to determine heterogeneities and discontinuities in concrete structures, and measures the thickness of concrete parts. It can also be used to determine the modulus of elasticity or Poisson's ratio of structural concrete. Ultrasonic testing is based on the transmission, reflection and absorption of ultrasonic waves within the material to be tested.

KEYWORDS : Concrete, non-destructive testing, pathologies, ultrasonic waves, correlation.

SOMMAIRE

Liste des figures	I
Liste des tableaux	II
Liste des photos	III
Liste des symboles	IV
Introduction générale	1
CHAPITRE I : Le Béton	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les constituants du béton courant	3
I.2.1 Le ciment Portland	4
I.2.2 Les granulats.....	4
I.2.3 L'eau de gâchage	5
I.2.4 Les charges fines complémentaires	5
I.2.5 Les adjuvants	6
I.3 Les différents types de bétons	7
I.3.1 Les bétons courants	7
I.3.2 Les bétons lourds	7
I.3.3 Les bétons légers	7
I.3.4 Les bétons autoplaçants.....	7
I.3.5 Les bétons fibrés	7
I.3.6 Les bétons à hautes performances.....	8
I.4 Formulation et compositions des bétons courants	8
I.5 Caractérisation des bétons courants à l'état frais.....	10
I.5.1 Essai d'affaissement ou cône d'Abrams ou Slump-test :	10
I.5.2 La masse volumique du béton frais	11
I.5.3 L'air occlus	11
I.6 Caractéristiques du béton à l'état durci	13
I.6.1 Résistance à la compression.....	13
I.6.2 Résistance à la traction	14
I.6.3 Masse volumique du béton durci.....	15
I.6.4 La porosité	15
I.6.5 La perméabilité	18
I.7 Conclusion	19
Références Bibliographiques	20
Références Nétographiques	22

CHAPITRE II : Dégradation des structures en béton

II.1	Introduction.....	23
II.2	Les causes des dégradations	23
II.2.1	Les attaques sulfatiques	23
II.2.2	Les alcalis-réactions	24
II.2.3	La carbonatation.....	26
II.2.4	La corrosion des armatures métalliques	27
II.2.5	Le gel-dégel	29
II.2.6	Les sels de déverglaçage.....	30
II.3	Indicateurs de durabilité du béton.....	31
II.4	Conclusion du chapitre.....	32
	Références Bibliographiques	33
	Références Nétographiques	34

CHAPITRE III : Le Contrôle non destructif

III.1	Introduction.....	35
III.2	Les techniques du contrôle non destructif	35
III.2.1	Avantages des essais non destructifs	40
III.2.2	Inconvénients des essais non destructifs.....	40
III.3	Les méthodes ultrasonores	40
III.3.1	Principe de fonctionnement des ultrasons.....	41
III.3.2	Mode de propagation et longueur du parcours des ultrasons	43
III.3.3	Facteurs influant sur les mesures des vitesses de propagation du son	44
III.4	Propagation des ondes dans différents milieux.....	46
III.4.1	Les différents types d'ondes ultrasonores	46
III.4.2	Vitesses de propagation des ultrasons	48
III.4.3	Atténuation, absorption et diffraction des ondes ultrasonores.....	49
III.4.4	Détection des défauts	51
III.5	Conclusion	53
	Référence bibliographique	55
	Références Nétographiques	58

CHAPITRE I V : Corrélations entre les essais ultrasoniques et les propriétés du béton

IV.1	Introduction.....	59
IV.2	Les résistances	59
IV.2.1	Influence de la composition du béton sur la résistance.....	61
IV.2.2	Quelques corrélations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances	61
IV.3	Les propriétés de transferts.....	64

IV.3.1	La porosité	64
IV.3.1.1	Quelques corrélations entre les vitesses ultrasonores et la porosité	64
IV.3.2	La perméabilité	69
IV.3.2.1	Influence du rapport E/C et le degré de cure sur la perméabilité	70
IV.3.2.2	Quelques corrélations entre les vitesses ultrasonores et la perméabilité	72
IV.4	Évaluation non destructive des dommages au béton par ultrasons	73
IV.4.1	Endommagement par l'alcali-réaction ou réaction alcali-granulat	74
IV.4.2	Endommagement par chocs thermiques et cycles gel-dégel	77
IV.5	Conclusion du chapitre.....	79
	Références Bibliographiques	81
	Références Nétographiques	84
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	85

LISTES DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams	10
Figure I.2 : Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression.....	13
Figure I.3 : Différents essais de mesure de la résistance à la traction du béton	15
Figure I.4 : Description schématique d'un matériau poreux	16

Chapitre II

Figure II.1 : Processus de corrosion dans le béton armé.....	28
---	----

Chapitre III

Figure III.1 : Les trois catégories d'onde acoustique	41
Figure III.2 : Schéma d'un transducteur à ultrason	42
Figure III.3 : Vitesse de propagation déterminée en transmission indirecte ou de surface	43
Figure III.4 : Position des transducteurs.....	44
Figure III.5 : Polarisation propagation des ondes longitudinales et transversales	47
Figure III.6 : Propagation des ondes de Rayleigh et de love	47
Figure III.7 : Multidiffusion dans le béton	50
Figure III.8 : Propagation d'un faisceau émis par une source de dimensions finies.....	51
Figure III.9 : Intensité acoustique sur l'axe du faisceau.....	51
Figure III.10 : Distribution de l'amplitude du faisceau ultrasonore.....	51
Figure III.11 : Techniques à capteurs distincts (transmission)	52
Figure III.12 : Techniques à capteurs distincts (pitch-catch)	53

Chapitre IV

Figure IV.1 : Corrélation Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique.....	62
Figure IV.2 : Corrélation vitesse ultrasonique et résistance à la compression	64
Figure IV.3.a : Porosité en fonction de la variation des vitesses ultrasonique (transducteur D, avec $EC \geq 0.50$).	67
Figure IV.3.b : Porosité en fonction de la variation des vitesses ultrasonique (transducteur d, avec $EC \geq 0.50$).	67
Figure IV.4.a : Relation entre les vitesses ultrasonique et la porosité de tous les bétons (transducteurs D, avec $EC \geq 0.42$).	68
Figure IV.4.b : Relation entre les vitesses ultrasoniques et la porosité de tous les bétons (transducteurs d, avec $EC \geq 0.42$).	68
Figure IV.5 : Corrélations entre la vitesse d'impulsion ultrasonore et la porosité.....	69
Figure IV.6.a : Evolution de la perméabilité à l'air (K) en fonction du rapport E/C	71
(Bétons conservés à l'air libre).	71
Figure IV.6.b : Evolution de la perméabilité à l'air (K) en fonction du rapport E/C	71
(Bétons conservés dans l'eau).	71
Figure IV.7.a : Evolution de la perméabilité en fonction des vitesses des ultrasons	72
(Béton conservés à l'air libre)	72
Figure IV.7.b : Evolution de la perméabilité en fonction des vitesses des ultrasons.....	73
(Béton conservés dans l'eau).....	73
Figure IV.8 : Variation de la dilatation des échantillons dans le temps.....	75
Figure IV.9 : Variation de la vitesse des ondes ultrasonores en fonction de l'âge de l'échantillon	76
Figure IV.10 : Variation des paramètres acoustiques linéaires suite aux chocs thermiques (a) et cycles de gel/dégel (b).....	77

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : Le dosage des constituants de béton en poids et en volumes absolus9

Tableau I.2 : Vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton 11

Chapitre III

Tableau III.1 : Incidence des dimensions des éprouvettes sur la transmission de l'impulsion46

Tableau III.2 : Vitesse acoustiques48

Chapitre IV

Tableau IV.1 : Résultats des différents essais63

Tableau IV.2 : Diminution de la perméabilité en fonction de l'âge70

Tableau IV.3 : Les étapes d'endommagement par la réaction alcali-granulat.75

LISTE DES PHOTOS

Chapitre I

Photo I.1 : les constituants du béton ordinaires	3
Photo I.2 : Dispositif expérimental de l'aéromètre à béton.....	12
Photo I.3 : Dispositif de saturation	17
Photo I.4 : Perméabilimètre Cembureau	19
Photo II.1 : Poteau en béton dégradé par les attaques sulfatiques interne et externe.....	24

Chapitre II

Photo II.2 : Mur en béton dégradé par la réaction alcali-granulats.....	26
Photo II.3 : Phénomène de carbonatation	27
Photo II.4 : Poteau en béton armé dégradé par la corrosion.....	28
Photo II.6 : (a) Fissuration interne et (b) écaillage de la surface.....	30
Photo II.7 : Dégradation due aux sels de déverglaçage	31

Chapitre III

Photo III.1 : Equipement à ultrasons	42
---	----

Chapitre IV

Photo IV.1 : (a) Mesure en transparence et (b) l'essai d'écrasement à la presse.....	60
Photo IV.2 : Essais réalisés sur béton durci	62
Photo IV.3 : Fissures dans la pâte de ciment après deux chocs thermiques - baisse de 7% d'UPV	78
Photo IV.4 : Coupe d'un échantillon après 200 cycles de gel/dégel - baisse de 50% d'UPV	79

LISTE DES SYMBOLES

E	Eau
C	Ciments
E/C	rapport eau/ciment
R_c	résistance à la compression
R_t	résistance à la traction
CND	contrôle non destructif
ρ	La masse volumique (kg/m ³)
λ	Longueur d'onde ultrasonore (m)
V	Vitesse ultrasonore (m/s)
f	Fréquence des transducteurs (kHz)
I	L'intensité ultrasonore (W.m ⁻²)
E	Module de Young (MPa)
ν	Coefficient de Poisson (sans dimension)
θ	Angle de divergence en degrés
α	Coefficient d'atténuation (dB/m)
UPV	Vitesse des ondes ultrasonore
P	Porosité accessible à l'eau
M_{air}	Masse éprouvette imbibée
M_{eau}	Masse éprouvette immergée dans l'eau
M_{sec}	Masse éprouvette sèche
K_a	Coefficient spécifique de perméabilité apparente à l'air (m ²)

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Au cours de leur durée de vie les structures en génie civil, bâtiments, ouvrage d'art, galeries, routes, ... doivent résister aux charges auxquelles elles sont soumises, ainsi qu'aux diverses actions climatiques tout en conservant leurs esthétismes. Elles doivent satisfaire, avec un niveau constant, les besoins des utilisateurs au cours de sa durée de service.

L'ouvrage a pour but de servir aussi longtemps que possible moyennant bien sûr un minimum d'entretien et une surveillance régulière. Généralement le matériau employé est le béton presque toujours associé à l'acier. L'influence des armatures sera prise en compte dans la durabilité de l'ouvrage à cause de la corrosion. Mais généralement, l'étude porte sur le béton seul car les armatures sont protégées de l'extérieur par quelques centimètres de béton appelés épaisseur d'enrobage. Cette couche protectrice est très importante pour la durée de vie de l'ouvrage ; elle empêche la réduction des performances mécaniques suite à la corrosion des armatures. De plus, il est assez facile de refaire cette couche protectrice quand elle est dégradée et ainsi prolonger la durée de vie de l'ouvrage

Prescrire un béton durable nécessite d'apprécier, dès sa conception, l'ensemble des contraintes environnementales et les dégradations potentielles qu'il aura à subir pendant toute sa durée de service, de respecter et mettre en œuvre les recommandations en vigueur.

La dégradation des ouvrages d'art en béton armé s'avère donc un défi de taille pour les propriétaires qui doivent affronter les problématiques associées à leur vieillissement.

L'identification des origines et les causes de ces dégradations sont une des étapes les plus importantes et les plus difficiles de tout le processus de réparation des structures endommagées. Il faut donc prévoir une campagne d'évaluation détaillée de l'état de la structure où elle varie d'une simple évaluation visuelle jusqu'à être beaucoup plus détaillée et comporte toute une série de prélèvements ou d'analyses in situ ou en laboratoire, son but sera d'obtenir des informations sur l'étendue des dommages et d'établir les causes

C'est dans ce cadre de contribution au développement durable des ouvrages en génie civil par l'utilisation de l'auscultation sonique que s'inscrit notre mémoire de fin d'études de master. L'auscultation du béton armé constitue un outil décisionnel puissant pour l'ingénieur responsable de maintenir en service et de prolonger la durée de vie des structures.

Structuration du mémoire

Notre mémoire est construit en quatre chapitres.

Le premier chapitre intitulé « **Béton** » présente une étude bibliographique sur le béton, notamment ses constituants, les différents types de bétons, les méthodes de formulation du béton ainsi que la caractérisation des propriétés du béton (ouvrabilité, masse volumique, air occlus, résistance à la compression et à la traction, porosité, et la perméabilité).

Le second chapitre est intitulé « **Dégradation des structures en béton** » ; comme son nom l'indique le but de ce chapitre est de présenter les désordres observables sur les structures en béton, de déterminer les facteurs qui les favorisent ainsi que leurs impacts sur la durabilité.

Le troisième chapitre intitulé « **Contrôle non destructif** » ; expose une synthèse sur les différentes méthodes de contrôle non destructif, plus particulièrement sur le contrôle par ultrason. Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique approfondie sur la technique d'auscultation sonore (principe, différents types d'onde, limites, mode de propagation, atténuation ...).

Dans le quatrième et dernier chapitre intitulé « **Corrélations entre les essais ultrasoniques et les propriétés du béton** », l'objectif est de faire le lien entre les mesures par ultrasons et les propriétés du béton, en faisant des corrélations simples et convenables reliant ces différents paramètres. Nous avons également évalué quelques pathologies du béton par la méthode des ultrasons.

Le document se termine par une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus, à travers cette recherche bibliographique.

CHAPITRE I : Le béton

Ce chapitre présente une étude bibliographique sur le béton, notamment ses constituants, les différents types de bétons, les méthodes de formulation du béton ainsi que la caractérisation des propriétés du béton (ouvrabilité, masse volumique, air occlus, résistance à la compression et à la traction, porosité, et la perméabilité).

I.1 Introduction

Le béton est un matériau omniprésent aujourd'hui, tant dans le monde de la construction que dans d'autres domaines tels que l'art. À la fois économique et facilement manipulable, le béton répond à de nombreux critères de performance. Sa durabilité, sa résistance au feu, son isolation phonique, ses propriétés thermiques, etc. ; font de lui un matériau incontournable dans le domaine de la construction.

Il est constitué d'un liant dont le ciment qui sert de « colle », de granulats de différentes dimensions, d'eau, on y ajoute éventuellement des adjuvants pour améliorer ses caractéristiques à l'état frais ou à l'état durci [Net-1].

La réaction chimique qui permet au béton de faire prise est lente (50% de la résistance finale au bout de 7 jours). La valeur prise comme référence dans les calculs est celle obtenue à 28 jours (80% de la résistance finale) [Net-2].

Le type de liant utilisé peut être différent du ciment, on parle alors, selon le liant utilisé, de béton de résine, de béton bitumineux, de béton de terre, etc.

Dans ce chapitre nous allons parler des différents constituants du béton courant, des différents types de bétons, de la formulation du béton ainsi que des caractéristiques du béton à l'état frais et durci.

I.2 Les constituants du béton courant

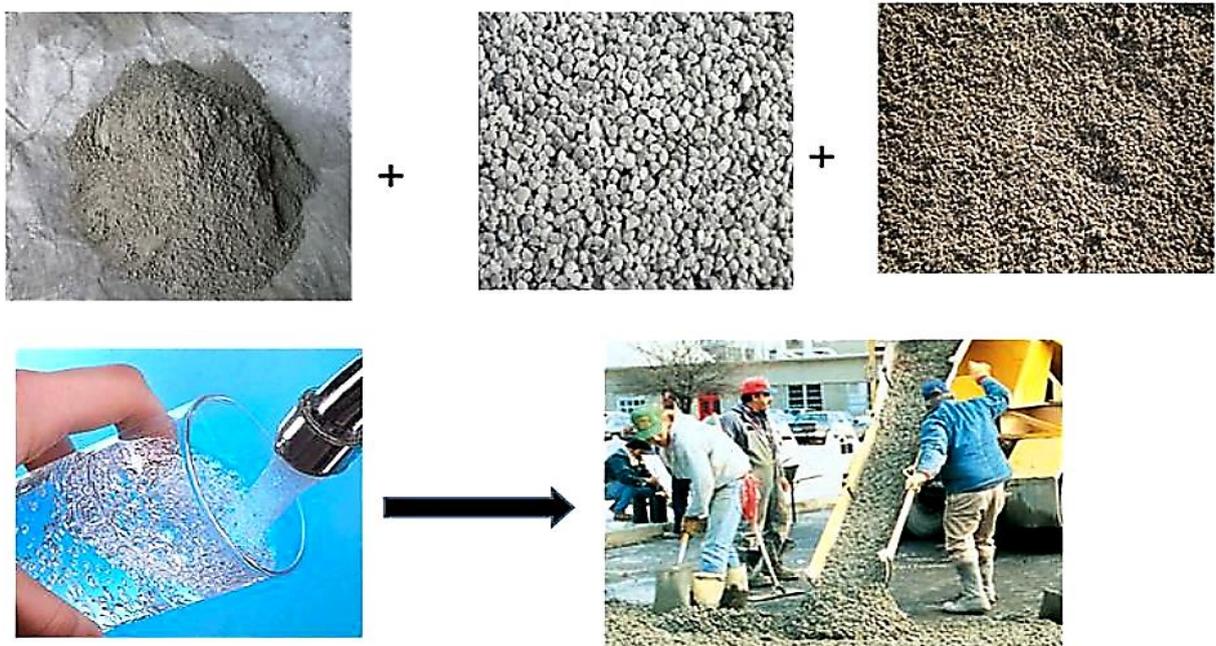


Photo I.1 : les constituants du béton ordinaires [Laldji 2015].

I.2.1 Le ciment Portland

Le ciment Portland est un liant hydraulique qui fait prise et durcit en vertu d'une réaction chimique à l'eau nommée hydratation.

Le composé de base du ciment est le clinker. Le clinker est obtenu par cuisson dans un four (à 1450°C) d'un mélange de calcaire et d'argile. Le clinker portland obtenu après refroidissement rapide est ensuite finement broyé avec un soupçon de gypse [Rabah 2016].

Les ciments sont répartis en trois classes, 32,5 - 42,5 - 52,5, en fonction de leurs résistances mécaniques à la compression à 28 jours (en N/mm²).

Il existe cinq types de ciments selon les constituants utilisés et leurs proportions [Net-3].

- Ciment Portland (CEM I) : contient au minimum 95 % de clinker et au maximum 5 % de constituants secondaires. Il est utilisé pour le béton armé ou le béton précontraint ;
- Ciment Portland composé (CEM II) : contient au moins 65% de clinker et au plus 35 % d'autres constituants secondaires (laitier de haut-fourneau, fumée de silice, pouzzolane naturelle, cendres volantes siliceuses, schiste calciné et de calcaire). Il est employé pour le mortier devant être étanche à l'eau (murs de caves, murs de fondations, quais...);
- Ciment de haut fourneau (CEM III) : contient au moins 81 % de laitier issu des usines sidérurgiques et 5 à 19 % de clinker. Il est utilisé pour des ouvrages en contact avec des acides ou de l'eau de mer ;
- Ciment pouzzolanique (CEM IV) : contient 45 à 90 % de clinker, le reste étant des pouzzolanes naturelles, des cendres volantes siliceuses ou de la fumée de silice. Il est utilisé dans les travaux massifs en béton armé ou précontraint, travaux maritimes et ouvrages étanches.
- Ciments composés (CEM V) : contient 20 à 64 % de clinker, 18 à 50 % de cendres volantes et de laitier de haut fourneau. Ses propriétés sont proches de celles du ciment de haut fourneau mais il est plutôt utilisé dans les milieux moyennement agressifs.

I.2.2 Les granulats

C'est l'ensemble des grains minéraux de diamètre compris entre 0 et 80 mm, d'origine naturelle, artificielle ou recyclé utilisés pour la réalisation d'ouvrages de travaux publics et de bâtiments collectifs ou individuels. Selon leurs dimensions nous distinguons cinq classes granulaires (définies par la norme **NFP 18 101**) [Net-4] :

- ✓ Fines (fillers) : ≤ 0.08 mm
- ✓ Sable : $d < 1$ mm et $0.08 < D < 6.3$ mm

- ✓ Gravillons : $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D < 31.5 \text{ mm}$
- ✓ Cailloux : $d \geq 20 \text{ mm}$ et $D < 80 \text{ mm}$
- ✓ Graves : $6.3 \text{ mm} < D < 80 \text{ mm}$

Les granulats utilisés pour la fabrication du béton sont d'origine naturelle ; ils représentent à peu près 70% du volume total d'un béton. Les propriétés du béton frais et celles du béton durci, comme la résistance à la compression et la durabilité, dépendent fortement des propriétés des granulats utilisés à savoir la propreté et la granulométrie [Herihiri 2010].

Dans le domaine de la construction, les granulats sont classés en trois catégories [Bello 2015].

- Les granulats légers : masse volumique réelle inférieure ou égale à 2000 Kg/m^3 .
- Les granulats courants : masse volumique réelle comprise entre 2000 et 3000 Kg/m^3 .
- Les granulats lourds : masse volumique réelle supérieure ou égale à 3000 Kg/m^3 .

I.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage est un élément essentiel pour la fabrication du béton. Elle est ajoutée lors du mélange afin d'hydrater le ciment et permet de lier les constituants du béton entre eux.

L'eau doit être potable et ne doit contenir aucune impureté ; il est possible même si c'est à éviter d'utiliser l'eau de mer, mais dans le cas d'un béton non armé pour éviter les agressions des armatures par le sel [Benamrane 2017].

Il faut être attentif au dosage, car un excès d'eau nuit à la durabilité ou à la résistance du béton durci. La quantité d'eau dépend de la quantité de ciment, des granulats ou de la consistance que l'on veut avoir.

I.2.4 Les charges fines complémentaires

Les fines complémentaires sont des poudres minérales élaborées par concassage de matières premières ou de sous-produits industriels. Leur granulométrie est voisine de celle du ciment ou plus fine. Dans tous les cas, du fait de leur finesse, ces fines vont jouer un rôle actif vis-à-vis de la compacité du squelette en remplissant les vides existants [Backelandt 2005].

Nous présentons ci-dessous quelques fines complémentaires qu'on peut incorporer dans les compositions des bétons :

- Les laitiers de haut fourneau sont issus d'un sous-produit formé lors de la fabrication des fontes. Ils possèdent des propriétés hydrauliques latentes, qui ne peuvent être mobilisées que dans un milieu fortement basique. La réaction d'hydratation du laitier est une réaction qui agit sur les performances à long terme du béton.

- Les cendres volantes, ce sont des sous-produits industriels récupérés dans les dépoussiéreurs de cheminées des centrales thermiques fonctionnant au charbon pulvérisé. Composées essentiellement de silice et d'alumine, ces cendres présentent un caractère pouzzolanique. Cela signifie que la silice réactive, en se combinant avec la chaux produite lors de l'hydratation du ciment, donne de nouveaux hydrates (silicate de calcium hydraté). Cette réaction est extrêmement lente et ne peut contribuer qu'aux performances à long terme du béton.
- Les additions calcaires sont obtenues par broyage fin de roches calcaires. Inertes chimiquement, ces additions sont souvent appelées fillers calcaires, en référence à leur rôle de remplissage des vides. Ces additions contribuent à augmenter les performances mécaniques du béton.
- Les fumées de silice sont récupérées dans les dépoussiéreurs de l'industrie du silicium et de ses alliages. Il s'agit de particules sphériques très petites, environ 0,1 µm de diamètre, qui est essentiellement constitué de silice amorphe. Leurs spécificités leur procurent un caractère pouzzolanique.

I.2.5 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits chimiques qui, incorporés dans les bétons lors de leur malaxage ou avant leur mise en œuvre à des doses inférieures à 5 % du poids de ciment, provoquent des modifications des propriétés à l'état frais ou à l'état durci. Les adjuvants permettent d'améliorer physiquement et chimiquement les propriétés du béton [Net-5].

Les adjuvants sont classés en fonction de leurs effets [Zezerti et al. 2015] :

- Accélérateurs de prise : ils facilitent le bétonnage en temps froid ;
- Accélérateurs de durcissement : ils augmentent la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise ;
- Retardateurs de prise : ils ralentissent la prise en retardant l'hydratation du béton en temps chaud ;
- Plastifiants-réducteurs d'eau : ils permettent de modifier la consistance, d'augmenter la maniabilité du béton frais, de réduire la teneur en eau du béton et d'accroître sa résistance mécanique ;
- Superplastifiant : ils permettent de réduire la teneur en eau du béton, d'augmenter considérablement l'affaissement/l'étalement ou de produire les deux effets à la fois ;
- Entraîneur d'air : leur rôle est de créer de microscopiques bulles d'air dans le béton, d'améliorer la durabilité du béton soumis à l'action du gel.

I.3 Les différents types de bétons

Le béton est issu de l'association de multiples constituants. À la base, ceux-ci sont au nombre de quatre, à savoir du gravier, du sable, du ciment et de l'eau. Mais cette liste s'allonge très vite dès que des propriétés particulières sont visées [Backelandt 2005]. Il existe notamment :

I.3.1 Les bétons courants

Ils sont les plus utilisés aussi bien dans le domaine du bâtiment que dans les travaux publics, avec une masse volumique d'environ 2500 kg/m^3 [Cimbéton 2013].

I.3.2 Les bétons lourds

Avec des masses volumiques qui peuvent atteindre les 6000 kg/m^3 ; ils diffèrent des bétons classiques par les granulats employés (barytine, magnétite, hématite, déchets ferreux). En général fluidifié à cause du faible dosage en eau (eau/ciment = 0,4), ils se caractérisent par un retrait légèrement supérieur à celui d'un béton ordinaire et ne doivent pas subir de températures supérieures à 180°C [Cimbéton 2013].

I.3.3 Les bétons légers

Ils ont des masses volumiques après séchage variant entre 800 et 2100 kg/m^3 (norme **NF EN 206-1**). Les bétons légers sont utilisés dans le domaine du confort thermique d'une habitation (isolation thermique) et même comme éléments porteurs de charges qui permettent d'alléger la construction [Cormon 1973].

I.3.4 Les bétons autoplaçants

Utilisé pour la première fois au Japon vers la fin des années 1980 afin d'améliorer la rentabilité de la construction, et de diminuer les nuisances sonores ; le béton autoplaçant par définition, est un béton très fluide, homogène et stable, qui se caractérise par sa rapidité de mise en place sous l'effet de son poids propre sans l'utilisation d'un moyen de vibration. Ils se distinguent des bétons ordinaires, par leur capacité à s'acheminer dans les coffrages tout en conservant leur homogénéité et leur compacité [Messiad et Bourtal 2018].

I.3.5 Les bétons fibrés

Ce sont des matériaux composés de fibres (métalliques ou synthétiques) dosées de 0,5 à 2% par m^3 de béton. Ces fibres sont réparties de façon homogène afin de solidifier et renforcer le matériau. Ils permettent d'obtenir un béton amélioré qui peut convenir à de nombreux usages [Net-6].

I.3.6 Les bétons à hautes performances

Ils sont caractérisés par des résistances en compression allant de 50 à 100 MPa grâce à l'emploi d'ultrafines (essentiellement fumées de silice) et de superplastifiants. Au-delà d'une résistance en compression de 100 MPa on parle de **béton à très hautes performances (BTHP)** ; cette résistance peut d'ailleurs monter jusqu'à 200MPa (**Bétons Fibrés Ultra Haute Performance**) [Net-6].

I.4 Formulation et compositions des bétons courants

L'étude de la composition granulaire d'un béton, consiste à définir le mélange optimal des différents composants du béton (granulat, eau, ciment), afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, maniabilité, porosité, durabilité) pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause.

De nombreuses méthodes de composition du béton plus ou moins compliquées et ingénieuses ont été élaborées dont notamment (FAURY, BOLOMEY, VALLETTE, D'ABRAMS, DREUX-GORISSE,...).

Ces méthodes sont toutes basées sur une adaptation de résultats expérimentaux. Parmi elles, nous utilisant souvent la méthode dite DREUX- GORISSE

On distingue en fonction de la granularité du mélange constituant le béton deux types de méthodes de composition du béton [Net-7] :

À « granularité continue » lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue : autrement dit du plus petit grain de ciment aux plus gros grains des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.

On dit par contre que l'on a une « granularité discontinue » lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires.

❖ Méthode Dreux-Gorisse

La méthode "Dreux" est en fait une synthèse de celles qui ont abouti à des résultats favorables. C'est une méthode simplifiée qui est à la portée de tous les petits utilisateurs, car elle utilise des abaques pour déterminer les quantités des matériaux.

Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée à partir des données de base essentielles pour la formulation du béton tel que la dimension des granulats (**D**).

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau **E**, ciment **C**, sable **S** et gravier **G**) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable **[Bentata 2004]**.

- Le rapport C/E
- C et E

Une étude de composition du béton, doit toujours être contrôlée expérimentalement, une étude effectuée en laboratoire doit généralement être adaptée ultérieurement aux conditions réelles des chantiers.

La composition d'un béton et le dosage de ses constituants sont fortement influencés par l'emploi auquel est destiné le béton et par les moyens de mise en œuvre utilisés.

Dans la composition d'un béton, les deux relations suivantes interviennent **[Net-7]**

- La somme des poids des constituants de 1 m³ de béton fini est égale au poids de 1 m³ de béton fini. Si le ciment (C), l'eau (E) et les granulats (Gi) sont les poids des constituants en kg par m³ de béton fini et Δ. la densité du béton en place, on a :

$$C + E + \left(\sum G_i \right) = 1000 \quad (I.1)$$

- Le volume occupé par les constituants de 1 m³ de béton est égal à 1 m³. Si (C), (E) et(Gi) sont les volumes absolus des constituants en litres par m³ de béton fini, on a :

$$C + E + \left(\sum G_i \right) + V = 1000 \quad (I.2)$$

Il est avantageux d'écrire ces deux relations sous forme tabulaire :

Tableau I.1 : Le dosage des constituants de béton en poids et en volumes absolus **[Net-7]**.

Constituants	Dosage en poids (kg)		Masse spécifique (kg/dm ³)	Dosage en volume absolu (l/m ³)
	Par gâchée de α m ³	Par m ³		
Ciment	α C	C	γ C	c = C/ γ C
Eau	α E	E	1	e = E
Granulats 1	α G1	G1	γ G1	g1 = G1/ γ G1
Granulats 2	α G2	G2	γ G2	g2 = G2/ γ G2
Granulats 3	α G3	G3	γ G3	g3 = G3/ γ G3
Air	---	---	---	V
Σ	1000αΔ	1000Δ	---	1000

I.5 Caractérisation des bétons courants à l'état frais

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton [Laldji 2015].

- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats)
- Forme, granulométrie et type de granulats
- Le volume d'air
- Le dosage en eau.

I.5.1 Essai d'affaissement ou cône d'Abrams ou Slump-test :

Cet essai est incontestablement un des plus simples et des plus fréquemment utilisé pour déterminer l'ouvrabilité du béton frais, car il est très facile à mettre en œuvre.

Il consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance. En fonction de l'affaissement mesuré, la maniabilité du béton est appréciée et une manière de sa mise en œuvre est recommandée [Laldji2015]. L'appareillage est complètement montré sur la **figure I.1**.

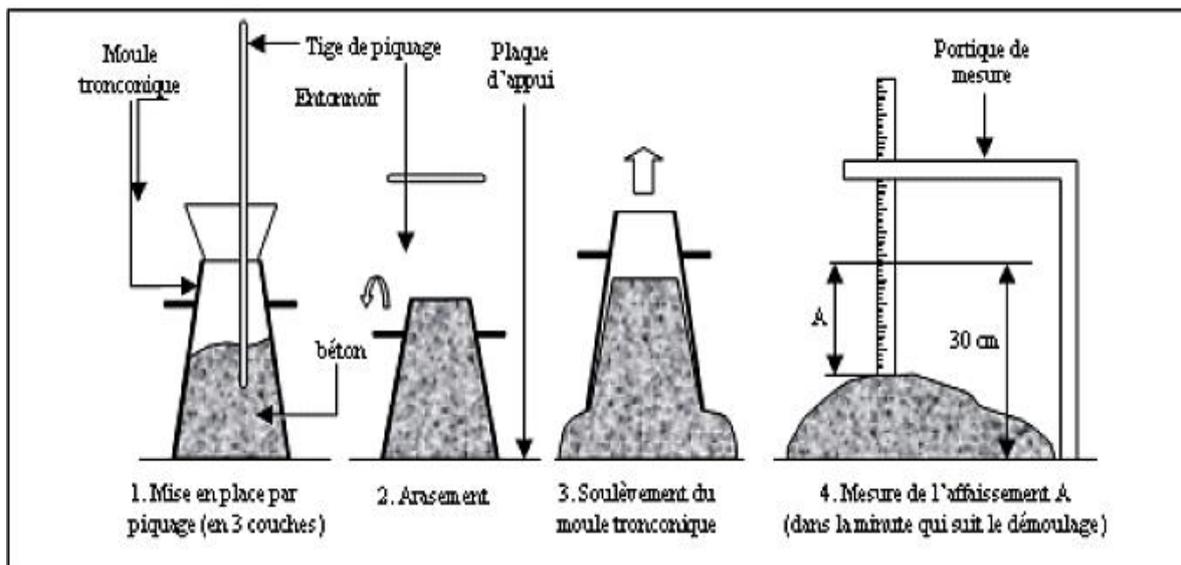


Figure I.1 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams [Laldji 2015].

Classes de consistance du béton

Il existe 5 différentes classes de consistance des bétons référencés par la norme (NF EN 2061). Ces classes sont définies par les essais d'affaissement du béton au cône d'Abrams.

Tableau I.2 : Vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton (NF EN 2061).

Affaissement	Béton	Mise en œuvre
0 – 2 cm	Très ferme	Vibration puissante
3 – 5 cm	Ferme	Bonne vibration
6 – 9 cm	Plastique	Vibration courate
10 – 13 cm	Mou	Piquage
> 13 cm	Très mou	Leger piquage

I.5.2 La masse volumique du béton frais

La masse volumique du béton frais peut être contrôlée à partir de la masse volumique théorique résultant du calcul de la formulation du béton. La comparaison de la masse volumique du béton frais théorique et celle mesurée permet d'obtenir des renseignements sur le degré de compactage et la composition du béton.

On mesure la masse volumique du béton frais à l'aide d'un récipient étanche à l'eau et suffisamment rigide. Le béton est mis en place dans le récipient et vibré à l'aide d'une aiguille vibrante, une table vibrante ou un serrage manuel en utilisant une barre ou tige de piquage, après un arasement approprié. Le récipient et son contenu doivent être pesés afin de déterminer la masse volumique qui sera calculée en utilisant la formule suivante [Messiad et Bourtal 2018] :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (I.3)$$

ρ : est la masse volumique du béton frais (kg/ m3).

m_1 : est la masse du récipient (kg).

m_2 : est la masse du récipient plus la masse du béton contenu dans le récipient (kg).

V : est le volume du récipient en mètre cube (m3).

La masse volumique du béton est arrondie aux 10 kg/m3 les plus proches.

I.5.3 L'air occlus

L'air occlus est le volume d'air relatif qui restera piégé dans le béton, même après la mise en œuvre. Pour réaliser un mortier le plus compact possible, il faut diminuer le volume d'eau

sans augmenter le volume d'air occlus et par conséquent sans diminuer la maniabilité du mélange [Malou 2007].

Pour la mesure de l'air occlus dans le béton frais, deux méthodes alternatives sont possibles :

- la méthode de la colonne d'eau,
- la méthode du manomètre.

Les deux essais sont effectués selon la norme Française **NF EN 12350-7**

❖ Méthode de la colonne d'eau

Dans cet essai, une colonne d'eau est appliquée sur un échantillon de béton jusqu'à une hauteur préalablement définie. Une pression d'air est exercée ensuite sur cette colonne d'eau. La réduction du volume d'air dans l'échantillon de béton s'exprime à travers une baisse de cette colonne d'eau. Le pourcentage de volume d'air dans le béton frais peut être déterminé ensuite par voie de calibrage [Net-8].

❖ Méthode de la compressibilité

Cet essai est effectué à l'aide d'un aéromètre à béton de 8 litres de capacité. Après le gâchage, nous mesurons la teneur en air occlus selon la norme NF EN 12350-7. À partir de cet essai, on détermine la quantité d'air présente dans un volume connu de béton frais.

L'essai consiste à remplir l'aéromètre (**cf. figure I.2**) en deux couches vibrées sur table vibrante à béton et à compléter le volume avec l'eau et à tapoter légèrement à l'aide du maillet afin d'éliminer l'air adhérent aux surfaces intérieures du couvercle. Ensuite, on ferme l'orifice et on applique la pression d'essai à l'aide de la pompe à air. La valeur enregistrée exprime le pourcentage d'air occlus par rapport au volume total de béton [Allahyari 2016].



Photo I.2 : Dispositif expérimental de l'aéromètre à béton [Allahyari 2016].

I.6 Caractéristiques du béton à l'état durci

La caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. Mais, il est aussi important de se soucier des autres caractéristiques telles que la perméabilité, la porosité etc... . Ces caractéristiques sont primordiales à la durabilité des ouvrages réalisés en béton.

I.6.1 Résistance à la compression

Un béton est défini par la valeur de sa résistance caractéristique à la compression à 28 jours, f_{c28} . La résistance à la compression du béton est mesurée par la charge conduisant à l'écrasement par compression axiale d'une éprouvette cylindrique de 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur ou bien des éprouvettes 10 x 10 x 10 cm. On peut aussi utiliser d'autres dimensions d'éprouvettes (11/22 et 15x15x15). Les éprouvettes sont chargées jusqu'à rupture dans une machine pour un essai de compression, la charge maximale atteinte est enregistrée et la résistance en compression est calculée. Les bétons courants ont une résistance de 20 à 30 MPa, ceux de bonne qualité atteignent 40 à 50 MPa.

La résistance à la compression est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_c = \frac{F}{A_c} \quad (I.4)$$

Où :

- σ_c : résistance en compression, exprimée en mégapascal (Newton par millimètres carrés) ;
- F : charge maximale, exprimée en Newtons ;
- A_c : l'aire de la section de l'éprouvette sur laquelle la force de compression est appliquée.

La résistance à la compression doit être exprimée à 0,5 MPa près.

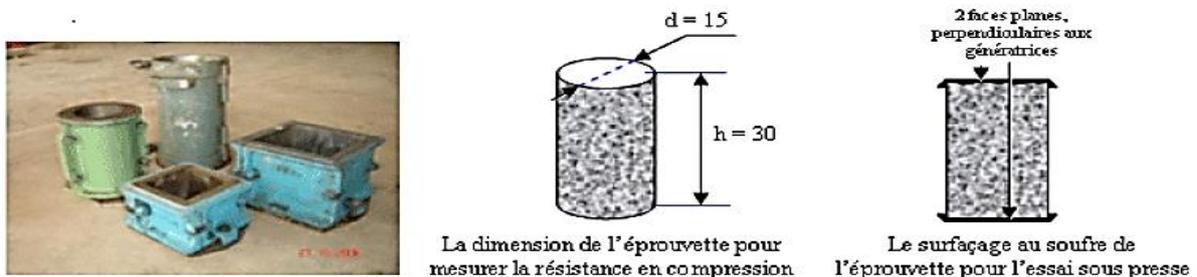


Figure I.2 : Les moules cylindriques, cubiques et les éprouvettes pour mesurer la résistance en compression [Net-7].

I.6.2 Résistance à la traction

Généralement le béton est un matériau travaillant bien en compression, mais on a parfois besoin de connaître la résistance en traction, en flexion, au cisaillement. La résistance en traction à 28 jours est désignée par f_{t28} .

A. La résistance en traction - flexion

Les essais les plus courants sont des essais de traction par flexion. Ils s'effectuent en général sur des éprouvettes prismatiques d'élanement 4, reposant sur deux appuis [Net-9] :

- Soit sous charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).
- Soit sous deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges).

B. La résistance en traction par fendage

L'essai consiste à écraser un cylindre de béton suivant deux génératrices opposées entre les plateaux d'une presse. Cet essai est souvent appelé "Essai Brésilien". Si P est la charge de compression maximale produisant l'éclatement du cylindre par mise en traction du diamètre vertical, la résistance en traction sera [Net-9] :

$$f_{tj} = \frac{2P}{\pi \cdot d \cdot L} \quad (I.5)$$

Avec :

j = âge du béton (en jours) au moment de l'essai ;

d et L = diamètre et longueur du cylindre.

C. La résistance en traction directe

La mesure se fait par mise en traction de cylindres identiques à celle de la résistance en traction par fendage, mais l'essai est assez délicat à réaliser car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite [Net-9].

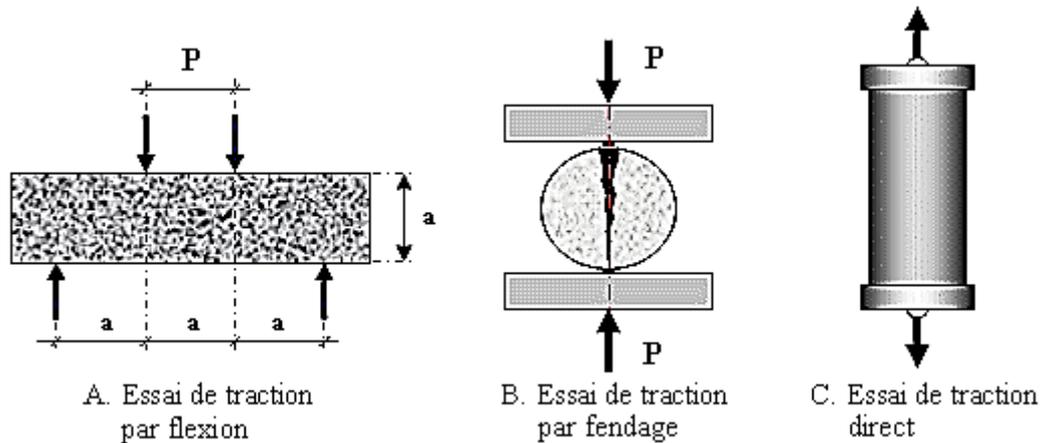


Figure 1.3 : Différents essais de mesure de la résistance à la traction du béton [Net-9].

I.6.3 Masse volumique du béton durci

La masse volumique d'un béton ordinaire utilisé dans les chaussées, les bâtiments et autres structures usuelles est comprise entre **2240 à 2400 kg/m³**. Elle dépend de la quantité et de la densité des matériaux, des quantités d'air. Le béton combiné avec des armatures donne naissance à un béton armé de masse volumique généralement accepté dans les calculs de **2400 kg/m³**. La formule qui nous permet de calculer théoriquement la masse volumique sèche est la suivante [Benchikh2011] :

$$\rho_{\text{sèche théorique}} = 1.25C + G \quad (I.6)$$

Avec :

C : la quantité de ciment en Kg/m³

G : la masse des granulats sec en Kg/m³

1.25 : est un facteur composé de 100% de la teneur en ciment +25% de la masse du ciment qu'est liée chimiquement à l'eau.

I.6.4 La porosité

Le béton est composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. Le solide est constitué des granulats, des hydrates et des parties du liant non hydratées. La phase liquide est la solution interstitielle et la phase gazeuse est un mélange d'air et de vapeur d'eau. Schématiquement, le béton, matériau poreux, peut être représenté selon la figure [Net-10].

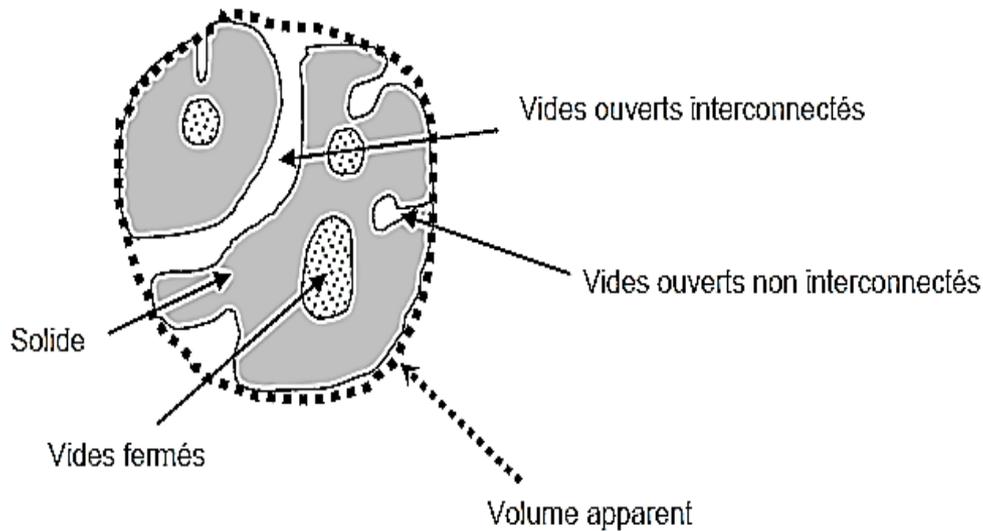


Figure I.4 : Description schématique d'un matériau poreux [Net-10].

Pour décrire un solide poreux, on définit les grandeurs suivantes :

- V_a , le volume apparent contenu dans l'enveloppe du matériau
- v_s , le volume de la partie solide du matériau
- v_o , le volume des pores « ouverts », c'est-à-dire communiquant avec l'extérieur,
- v_f , le volume des pores fermés.

On peut écrire les relations suivantes entre ces volumes :

V_s = volume du solide

V = volume des vides = $v_o + v_f$

V_a = volume apparent = $v_s + v$

On définit également des porosités en rapportant les volumes de vides au volume apparent :

la porosité ouverte + la porosité fermée → la porosité totale

$$p_o = \frac{v_o}{V_a} + p_f = \frac{v_f}{V_a} \rightarrow p = \frac{v}{V_a} = p_o + p_f \quad (I.7)$$

La durabilité est associée à la porosité ouverte (porosité accessible à l'eau) qui autorise la pénétration des agents agressifs extérieurs dans le béton.

La méthode de caractérisation la plus utilisée est sans aucun doute la mesure de la porosité accessible à l'eau. Cette méthode simple est utilisée pour une variété de mortiers, de pâtes de ciment ou de béton et est considérée comme la base de toute caractérisation microstructurale

ou évaluation des propriétés de durabilité d'un matériau. Il fournit un résultat global (porosité "totale"), indicateur de la qualité du matériau [Benouis et Grini 2011].

❖ **Mesure de la porosité accessible à l'eau**

Le principe de la mesure consiste à déterminer la part de vide contenu dans le matériau à l'état durci. La porosité à l'eau du matériau peut être déterminée par pesée hydrostatique. Les essais de porosité accessible à l'eau sont effectués selon le mode opératoire AFPCAFREM [AFPC 1997] (cf. figure I.6) sur des éprouvettes de diamètre 11 cm et de hauteur 22 cm, sciées en trois et placées dans un dessiccateur sous vide pendant 4 heures. Elles sont ensuite saturées dans l'eau sous vide pendant une durée de 48 heures. Les échantillons sont soumis à une pesée hydrostatique qui permettra d'évaluer leur masse apparente ($M_{sat, eau}$) et à une pesée dans l'air qui est assimilée à la masse saturée en eau ($M_{sat, air}$) après avoir essuyé leur surface avec un chiffon humide [Allahyari 2016].



Photo I.3 : Dispositif de saturation [Allahyari 2016].

Enfin, les échantillons sont placés dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante (une différence de moins de 0,05% entre 2 pesées effectuées à 24 heures d'écart) : la masse finale obtenue (M_{sec}) correspond à un état sec du matériau. La porosité accessible à l'eau est calculée suivant l'équation ci-dessous :

$$p_o = \frac{M_{sat,air} - M_{sec}}{M_{sat,air} - M_{sat,eau}} * 100 \quad (I.8)$$

p_o : porosité accessible à l'eau en %,

$M_{sat, air}$: masse (en gramme) de l'éprouvette saturée d'eau pesée dans l'air,

$M_{\text{sat, eau}}$: masse (en gramme) de l'éprouvette saturée d'eau pesée dans l'eau,

M_{sec} : masse (en gramme) de l'éprouvette sèche pesée dans l'air.

I.6.5 La perméabilité

La perméabilité d'un matériau est définie comme son aptitude à se laisser traverser par un fluide sous un gradient de pression. La perméabilité du béton se définit donc comme la propriété qui gouverne l'écoulement d'un fluide dans le solide poreux qu'est le béton.

La perméabilité aux gaz des bétons est grandement influencée par le volume des pores présents dans la matrice et elle détermine la facilité avec laquelle un liquide s'écoule dans le béton. La perméabilité a un impact important sur les propriétés liées à la durabilité des ouvrages en béton telle que la résistance aux cycles de gel-dégel et la résistance à la pénétration des ions de chlorures [Neville 2000].

❖ Mesure de la perméabilité à l'air

Les essais de perméabilité au gaz sont réalisés selon le protocole AFPC AFREM [AFPC, 1997] sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 15 cm et de hauteur 5 cm obtenues par sciage d'éprouvettes de diamètre 15 cm et de hauteur 20 cm. L'essai est effectué sur trois éprouvettes simultanément [Allahyari 2016].

L'essai sera réalisé à l'aide d'un perméabilimètre à charge constante du type CEMBUREAU. Cette méthode utilisée en diverses variantes, fait partie des méthodes standard pour déterminer la perméabilité au gaz d'un béton en laboratoire.

L'essai consiste à soumettre le corps d'épreuve à une pression constante de gaz. La perméabilité apparente k_a en m^2 , est alors déterminée à partir de la mesure du flux de gaz Q (en $m^3.s^{-1}$), en régime permanent, avec l'hypothèse d'un flux laminaire, à une pression donnée, en utilisant la loi de Hagen –Poiseuille :

$$k = \mu \frac{2QP_0L}{A(P^2 - P_a^2)} (m^2) \quad (I.9)$$

K : coefficient de perméabilité spécifique [m^2] (perméabilité à l'air)

A : section de l'éprouvette [m^2]

Q : débit du gaz [m^3/s]

L : épaisseur de l'éprouvette dans la direction de l'écoulement

μ : viscosité dynamique du gaz d'essai [Ns/m^2] (dans notre étude c'est l'air à 20°C : $\mu=1,82 \cdot 10^{-5} N/m^2$)

P : pression d'entrée (absolue) [N/m²]

P_a : pression de sortie (absolue) [N/m²] (pour ce test, cela correspond à la pression atmosphérique)

P_0 : pression à laquelle le débit est mesuré [Ns/m²] (habituellement : $P_0 = P_a$) [Kurt 2000] [Veronique 2002].



Photo I.4 : Perméabilimètre Cembureau [Allahyari 2016].

I.7 Conclusion

Le béton est un matériau hétérogène dont le choix des composants est en fonction des critères qui lui sont recherchés. Ces critères sont essentiellement les résistances mécaniques en compression, traction et flexion. Mais, ses propriétés mécaniques, bien qu'elles soient très importantes pour la conception même d'un ouvrage ou d'une structure ne sont pas forcément les seules à entrer en jeu. Même si un béton possède une excellente résistance mécanique, sa durabilité dans le temps n'est pas toujours prouvée.

La durabilité du béton dépend beaucoup de la porosité et de la perméabilité de celui-ci.

Les bétons faiblement poreux sont en général plus durables puisque leur faible perméabilité retarde entre autres la pénétration de l'eau et d'autres agents potentiellement agressifs.

Références Bibliographiques

[**Allahyari 2016**] Allahyari I., Approche performantielle des bétons : vers une meilleure caractérisation des indicateurs de durabilité, thèse de doctorat, université de Toulouse, Paris, France, 2016.

[**Backelandt 2005**] Backelandt A., Etude des mécanismes d'adhésion à l'interface résine/ciment en vue de la réparation des ouvrages en génie civil, thèse de doctorat INSA, Paris, France, 2005.

[**Bello 2015**] Bello L., Méthodologie de formulation des bétons autoplacants légers, rapport d'études et recherches, France, 2015.

[**Benamrane 2017**] Benamrane D., L'effet de la méthode de formulation sur la résistance à la compression du béton, mémoire de master, université d'Ouargla, Algérie 2017.

[**Benchikh 2011**] Benchikh C., Influence des particules fines sur les caractéristiques mécaniques et le retrait d'un béton ordinaire, mémoire de magister, université de Bejaïa, Algérie, 2011

[**Benouis et Grini 2011**] Benouis A. and Grini A., Estimation of concrete's porosity by ultrasound", S.D., Physics Procedia, 21, 53-58.

[**Bentata 2004**] Bentata A., Etude expérimentale de béton avec le sable dune», mémoire de magister, Université d'Ouargla, Algérie, 2004.

[**Cimbéton 2013**] Cimbéton, Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre, Tome 2, Collection Technique Cimbéton, France, 2013.

[**Cormon 1973**] Cormon P., Bétons légers d'aujourd'hui, Ed. Eyrolles, Paris, France, 1973.

[**Herihiri 2010**] Herihiri O., Formulation et caractérisation des bétons légers, mémoire de master, université de Biskra, Algérie, 2010.

[**Kurt 2000**] Kurt H., Perméabilité au gaz des bétons, Bulletin du ciment 68, 3-6 ,2000.

[**Laldji 2015**] Laldji S., Cours ETS : Caractéristiques fondamentales du béton, Université de Bejaia, France, 2015.

[**Malou 2007**] Malou M., Influence de l'introduction de fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire, thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie, 2007.

[**Messiad et Bourtal 2018**] Messiad B., Bourtal H., Etude comparative de durabilité entre les bétons autoplacants et les bétons ordinaires, mémoire de master, université de Guelma, Algérie, 2018.

[**Neville 2000**] Neville A., Propriétés des Bétons, Ed Eyrolles, Paris 2000, Traduit par le CRIB, 806 p.

[**Rabah 2016**] Rabah A., influence de la teneur des grains de forme d'aiguille et de plaquette dans les graviers roulés, sur les qualités d'un béton, mémoire de master, université de M'sila, Algérie, 2016.

[**Samia 2015**] Samia H., le contrôle non destructif des ouvrages en béton, évaluation de la résistance à la compression du béton sur site : application de la méthode combinée, thèse de

doctorat, université de Constantine, Algérie, 2015.

[Veronique 2002] Veronique B., Caractérisation microstructurales et propriétés relatives à la durabilité des bétons. Méthode d'essais N° 58. LCPC. France, 2002.

[Zezerti et Islam 2015] Zezerti A. et Islam M., Les adjuvants dans le béton, mémoire de BTS, Dakar, Sénégal, 2015.

Textes normatifs et recommandations

[AFPC, 1997] AFPC-AFREM Durabilité des bétons, méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité, pp 153-158, Toulouse, France, 1997.

[NF EN 12390-3]AFNOR, norme NF EN 12390-3, résistance à la compression des éprouvettes, 2012.

[NF EN 206-1]AFNOR, norme NF EN 206-1, Essai pour béton durci. Partie3 : Résistance à la compression des éprouvettes, Indice de classement, p18-455,2003

[Norme 12350-7]NF EN 12350-7 Essais pour béton frais - Partie 7 : teneur en air - Méthode de la compressibilité - Avril 2012.

[NFP 18 101] AFNOR, norme NF EN 18 101, Granulats – vocabulaire, définitions, classification, Décembre 1990

[NBN EN 12390-8]AFNOR, norme NF EN 12390-8, Essais pour béton durci. partie 8 : profondeur de pénétration d'eau sous pression, 2012.

Références Nétographiques

[Net-1] Bâtiment-béton.

<https://www.futura-science.com/bâtiment-béton>

Consulté le 03/03/2020

[Net-2] Merdas A., cours matériaux de construction.

<http://ft.univ-setif.dz/externe/departements/gc/Chapitre-I-les-Betons-MDC-II.pdf>

Consulté le 03/03/2020

[Net-3] Ciments types et compositions.

<https://www.infociments.fr/ciments/types-et-composition>

Consulté le 05/03/2020

[Net-4] Types de granulats.

<https://www.infociments.fr/betons/caracteristiques-et-types-de-granulats>

Consulté le 05/03/2020

[Net-5] les constituants du béton.

<https://www.infociments.fr/betons/adjuvants>

Consulté le 05/03/2020

[Net-6] Les différents types de bétons.

<https://www.guidebeton.com/betons/différents-types-béton>

Consulté le 07/03/2020

[Net-7] Béton

<https://www.exoco-lmd.com/beton-arme/cours-beton/?action=dlattach;attach=4952>

Consulté le 09/03/2020

[Net-8] Réalisation des essais courants sur béton frais et béton durci conseils pratiques

https://mediatheque.snbpe.org/userfiles/file/mediatheque/public/realisation_des_essais_courants_sur_beton_frais_et_beton_durci___conseils_pratiques.pdf

Consulté le 09/03/2020

[Net-9] Cours technologies des matériaux par Mr. Z. BENGHAZI

http://zied-benghazi.weebly.com/uploads/2/4/5/8/24585230/chapitre_iv_-_le_bton_de_ciment.pdf

Consulté le 11/03/2020

[Net-10] Ollivier J.P., Torrenti J.M., structure poreuse des bétons et les propriétés de transfert.

<https://www.researchgate.net/publication/290158099>

Consulté le 10/05/2020.

CHAPITRE II : Dégradation des structures en béton

Comme son nom l'indique le but de ce chapitre est de présenter les désordres observables sur les structures en béton, de déterminer les facteurs qui les favorisent ainsi que leurs impacts sur la durabilité.

II.1 Introduction

Les ouvrages en béton armé doivent être capables de remplir les fonctions pour lesquelles elles ont été conçues tout au long de leur durée de vie.

Pour atteindre cet objectif, il est souhaitable que le matériau composite béton-acier puisse résister aux multiples phénomènes (climatiques, physico-chimiques, mécaniques, etc.) pouvant entraîner de potentiels désordres et dégradations impactant directement leurs santé.

Ces désordres peuvent provoquer la réduction de la durée de vie de la structure et même la ruine prématurée de l'élément de structure. Il est donc primordial de pouvoir détecter ces pathologies suffisamment en amont afin d'en limiter les désordres.

Ce chapitre est consacré aux principales pathologies apparaissant dans les ouvrages en béton, leurs causes et leurs impacts sur la durabilité des ouvrages.

II.2 Les causes des dégradations

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif. Les principales causes de vieillissement sont liées aux phénomènes d'attaques sulfatiques, aux alcalis-réactions, à la carbonatation, à la corrosion des armatures, aux actions des cycles de gel-dégel, aux actions des sels de déverglaçage, ... [Benouis 2013].

II.2.1 Les attaques sulfatiques

La résistance du béton aux attaques des sulfates est l'un des facteurs les plus importants pour sa durabilité.

On distingue deux types d'attaques [Bensafir 2010] :

- les attaques sulfatiques externes présentes dans l'environnement du béton,
- les attaques sulfatiques internes pour lesquelles les sulfates proviennent des composants du béton lui-même.

Au cours de l'attaque sulfatique externe, il y a formation de couches de gypse et d'ettringite secondaire ainsi que la thaumasite à partir de la surface exposée aux sulfates. L'attaque par les sulfates externes est souvent combinée avec l'attaque par le cation correspondant, selon la provenance des sulfates, qui peuvent réagir avec certains granulats ou fillers, ou avec les C-S-H ou la portlandite, et contribuer davantage à la dégradation du béton.

Dans le cas d'une attaque interne par les sulfates, ces derniers proviennent presque uniquement des sulfates de calcium qui se trouvent dans le béton dès sa confection. Par conséquent, ces sulfates sont uniformément répartis dans la pâte hydratée et le seul produit expansif de la réaction est l'ettringite. L'ettringite secondaire qui est le résultat d'une attaque par les sulfates externes, n'est pas seule à endommager le béton, c'est plutôt la formation du gypse qui contribue à la fissuration et le délaminage des couches superficielles [Kerbouche 2009].



Photo II.1 : Poteau en béton dégradé par les attaques sulfatiques interne et externe [Net-1].

II.2.2 Les alcalis-réactions

L'alcali-réaction, que l'on appelle aussi communément réaction alcali-granulat, désigne la réaction chimique entre la silice amorphe ou mal cristallisée contenue dans les granulats réactifs et certains ions de la solution interstitielle.

Les conséquences macroscopiques de la réaction sont le gonflement des ouvrages atteints qui entraînent de la fissuration et la chute des caractéristiques mécaniques du béton. Ces phénomènes mettent en péril la sécurité des personnes et l'exploitation des ouvrages. De plus, il n'existe aucun moyen d'arrêter la réaction. Ainsi, la prédiction de l'évolution du gonflement et des dégradations des ouvrages atteints et l'évaluation de l'efficacité et de la périodicité des opérations d'entretien sont des points cruciaux [Bensafir 2010].

Les alcalis-réactions se présentent sous trois types : réaction alcali-silice (la plus fréquente), réaction alcali-silicate et réaction alcali-carbonate.

- **Réaction alcali-silice (RAS) :**

Certains granulats siliceux, lorsqu'ils sont constitués de silice amorphe, mal cristallisée ou microcristalline (par exemple des verres, de l'opale, de la calcédoine...) sont attaqués par la solution interstitielle qui occupe les pores du béton. La silice libérée réagit ensuite avec les alcalins Na^+ , K^+ de cette solution interstitielle et l'on observe finalement, l'apparition de gel silico-alcalins s'ils renferment du Si, Na (et ou K) ou calco-silico-alcalins s'ils contiennent, en plus, du calcium.

- **Réaction alcali-silicate :**

La différence essentielle avec la réaction alcali-silice réside dans le fait que les granulats réactifs ne sont pas formés de silice libre mais sont des silicates variés. En ce qui concerne les produits de la réaction, ils sont voisins de ceux apparus dans la réaction alcali-silice.

- **Réaction alcali-carbonate :**

On désigne par cette expression la réaction manifestée par des calcaires dolomitiques qui renferment des impuretés phylliteuses. Ces expansions causées par cette réaction sont moins importantes que celles dues aux réactions alcali-silice et alcali-silicate sauf si le béton est soumis à des ambiances hivernales rigoureuses [**Olivier 2008**].

Pour que la réaction se produise, trois éléments sont nécessaires [**Net-2**] :

- la présence en quantité suffisante de granulats réactifs (contenant de la silice amorphe ou incomplètement cristallisée, comme l'opale) ;
- une teneur en alcalins (sodium ou potassium) élevée dans la solution interstitielle ;
- une humidité relative ambiante élevée (> 85 %).



Photo II.2 : Mur en béton dégradé par la réaction alcali-granulat [Net-2].

II.2.3 La carbonatation

Réaction chimique entre le gaz carbonique (CO_2) de l'air et la chaux (contenue dans le ciment du béton) libérée par l'hydratation des carbonates de calcium CaCO_3 : la carbonatation provoque l'abaissement du pH du béton (d'une valeur de l'ordre de 12.6 à 13.5 à une valeur d'environ 9) ; et donc son aptitude naturelle à protéger les armatures en présence d'eau (la corrosion provoque le gonflement des armatures et finit par faire éclater le béton d'enrobage) [Net-3].

La carbonatation commence donc à la surface du béton et concerne une certaine épaisseur (profondeur de carbonatation) de ce matériau, ses effets sont importants [Benouis 2013].

Ainsi, la combinaison du dioxyde de carbone avec l'hydroxyde de calcium donne lieu à un carbonate de calcium comme le montre la réaction suivante [Oualit 2009].



Les principaux facteurs influant la carbonatation sont :

- La composition du béton,
- Le dosage en eau et en ciment rapport E/C,
- Le milieu et la nature de l'ouvrage,
- Le rapport surface/volume.

La carbonatation du béton n'est pas un phénomène nouveau et reste un sujet d'actualité, car de nombreux bâtiments ou ouvrages d'art sont atteints par la combinaison des effets de la pollution atmosphérique et l'utilisation de sels de déverglaçage (chlorures). Aujourd'hui, des mesures préventives peuvent être prises, telles que l'augmentation de la qualité du béton, la surveillance lors de sa mise sur place et l'augmentation du recouvrement d'armatures [Net-3].



Photo II.3 : Phénomène de carbonatation [Itmaizeh 2016].

II.2.4 La corrosion des armatures métalliques

Le béton, du fait de sa forte alcalinité, apporte aux armatures une excellente protection face à la corrosion. Dans ces conditions de pH, l'acier est protégé grâce à la formation d'un film extrêmement mince et adhérent appelé film passif pouvant être constitué de divers oxydes.

En présence d'eau et d'oxygène, ce film est détruit par différents agents tels que les chlorures, les sulfates et le gaz carbonique. Le métal est alors dépassivé et la corrosion devient possible avec formation de nouveaux oxydes, dont le volume au moins deux fois supérieur (jusqu'à six fois supérieur pour certains oxydes) à celui du fer initial entraînera des fissurations du béton qui accéléreront le processus de corrosion en facilitant la diffusion de l'oxygène et des espèces corrosives [Lesueur 2004].



Photo II.4 : Poteau en béton armé dégradé par la corrosion [Bensafir 2010].

❖ **Processus de la corrosion :**

Les corps dissous dans le milieu qui environne l’ouvrage, peuvent pénétrer progressivement dans le béton. Certains d’entre eux sont agressifs, par exemple le dioxyde de carbone (CO₂), les acides (engrais, etc.) et les chlorures. Un acier mis au contact d’un béton qui a une forte basicité (pH de l’ordre de 12) et qui n’est pas pollué par des chlorures, se recouvre d’oxydes protecteurs. Si son enrobage est chimiquement modifié, cet acier se recouvre de produits “intermédiaires” qui ne sont pas stables en présence d’oxygène dissous dans le béton. Ils se transforment en des produits “finaux” non protecteurs, ce qui conduit à la dissolution et à l’enrouillement continu de l’acier [Benouis 2013].

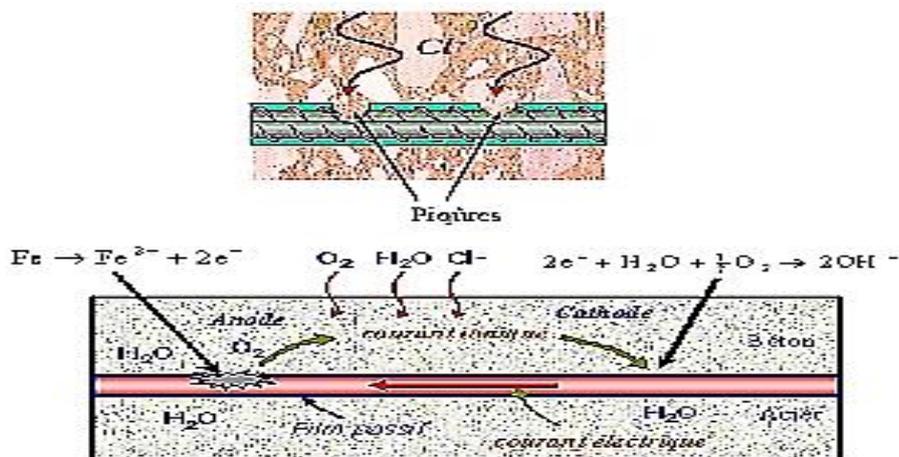


Figure II.1 : Processus de corrosion dans le béton armé [Nguyen 2007].

II.2.5 Le gel-dégel

La dégradation du béton par les cycles de gel et de dégel est due essentiellement à la transformation en glace de l'eau contenue dans les capillaires de la pâte de ciment ou dans les granulats ; la formation de la glace implique une augmentation de volume d'environ 10%.

Cette expansion, associée au mouvement de l'eau qui n'a pas encore gelé dans les capillaires du béton, va engendrer des pressions hydrauliques internes importantes, dépassant la capacité de résistance à la traction du béton. Il en résulte certains dommages : la répétition fréquente des cycles de gel - dégel fait apparaître un réseau très dense de microfissures dans la zone superficielle du béton [Net -4].

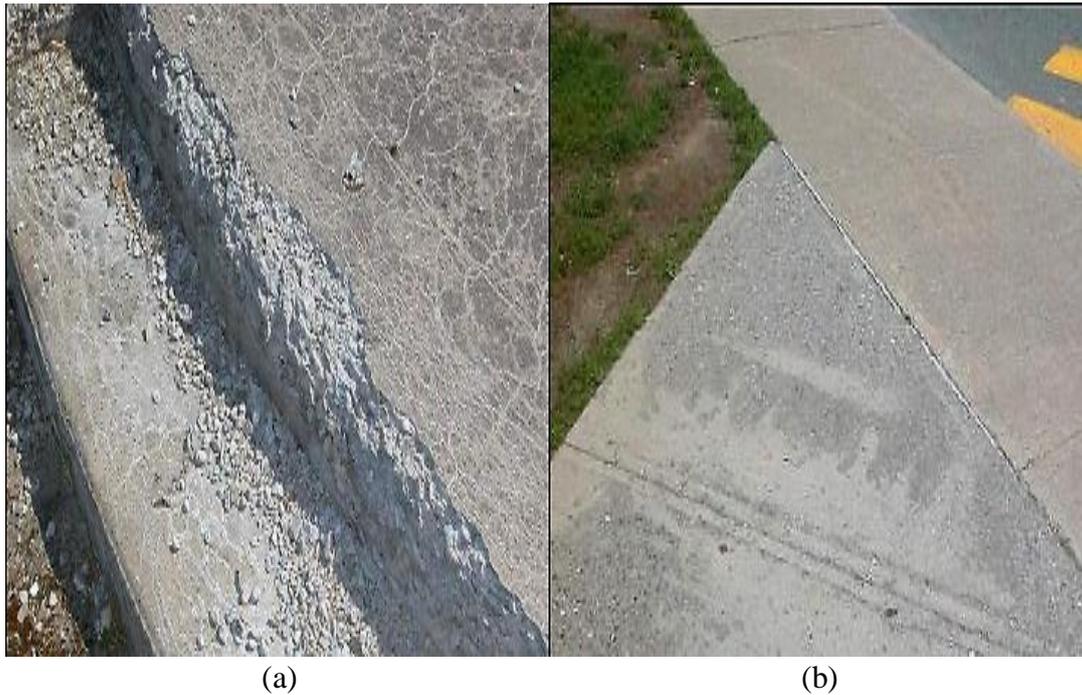
Les dégradations par le gel ne peuvent intervenir que lorsque les matériaux sont au contact de l'eau, dans un état voisin de la saturation. Le béton durci, dans la majorité des cas, résiste aux effets du gel, il arrive cependant que des conditions climatiques particulièrement sévères puissent entraîner la dégradation des bétons mal formulés, mis en œuvre de façon incorrecte et, de surcroît, saturés d'eau. Le gel n'est donc susceptible d'occasionner des dégradations aux ouvrages en béton que dans des cas limités, où se trouvent simultanément réunies plusieurs conditions défavorables [Kherif 2019].

La sensibilité au gel du béton durci dépend dans une large mesure de sa structure poreuse et des dimensions des fissures. Le risque de dégâts de gel est plus important sur des dalles ou des plans horizontaux que sur des surfaces verticales, les pores étant davantage saturés en eau [Itmaizeh 2016].

L'action des cycles de gel-dégel produit deux types de dégradations [Net-5] :

- **la fissuration interne** : il s'agit d'une dégradation qui touche toute la masse de béton soumise à des cycles de gel-dégel. Cette dégradation se manifeste par l'apparition d'une intense microfissuration du béton non seulement en surface mais aussi à l'intérieur de la masse de béton soumis au gel.
- **l'écaillage des surfaces** : il s'agit d'un mode de dégradation qui se produit principalement lorsque le béton est en contact avec des sels fondants. Il se manifeste par le décollement progressif de petites particules de pâte qui ont souvent la forme de petites écailles.

Ces deux types de dégradations ont pour origine des processus différents et ne surviennent pas nécessairement en même temps lorsque les bétons sont exposés aux cycles de gel-dégel.



PhotoII.6 :(a)Fissuration interne et (b) écaillage de la surface [**Kherif 2019**].

II.2.6 Les sels de déverglaçage

La cause principale des dégradations de surface résultant de la diffusion des sels de déverglaçage dans les capillaires du béton ; est un accroissement des pressions [**Cimbéton 2004**].

Les sels de déverglaçage employés pour faire fondre la glace induisent une réaction endothermique. En l'occurrence, la chaleur est prélevée dans la couche superficielle du béton qui, en raison de la chute brutale de température, subit un choc thermique et s'expose ainsi à un risque d'écaillage. Le risque de dégradation par le gel est encore accru lorsque des précipitations neigeuses prolongées alternent avec des épandages de sels répétés et que la couche superficielle du béton peut se trouver saturée en eau [**Itmaizeh 2016**].

L'eau qui gèle dans le béton est en réalité une solution saline. Au cours du gel, il se produit une séparation en glace d'une part, moins concentrée en sel qu'au départ, et en solution saline d'autre part, qui est donc devenue plus concentrée en sels. Il s'établit donc un flux pour rééquilibrer ces concentrations en sels. Ce flux engendre une pression dans le matériau qui peut mener à une fissuration ou écaillage, suivant la profondeur à laquelle ces pressions prennent place [**Net -4**].



Photo II.7 : Dégradation due aux sels de déverglaçage [Itmaizeh 2016].

II.3 Indicateurs de durabilité du béton

Il s'agit de paramètres relatifs au matériau constitutif, (béton), qui apparaissent comme fondamentaux pour l'évaluation et la prédiction de la durabilité du matériau et de la structure vis-à-vis d'un ou de plusieurs processus de dégradation. Ces paramètres doivent être facilement quantifiables à partir d'essais de laboratoire pratiqués sur éprouvettes ou sur prélèvements, selon des modes opératoires bien définis et validés. Les méthodes d'essai doivent de plus présenter une reproductibilité, une précision, une simplicité et une rapidité adéquates [Oualit 2009].

Les indicateurs de durabilité généraux, cités ci-après sont des paramètres de premier ordre dans l'évaluation et la prévision de la durabilité. Ils sont indispensables pour la prévention vis-à-vis de la corrosion des armatures et de l'alcali réaction. Ces indicateurs sont les suivants [Dreux et Festa 1998] :

- Porosité accessible à l'eau ;
- Coefficient de diffusion des ions chlorures ;
- Perméabilité à l'eau liquide et au gaz ;
- Teneur en portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

Les indicateurs de durabilité généraux sont complétés le plus souvent par des indicateurs spécifiques au processus de dégradation auquel l'ouvrage sera exposé.

Dans le cas de la prévention des dégradations dues à l'alcali-réaction, les indicateurs spécifiques retenus sont classés en deux catégories qui sont les suivants [Kassoumi et al. 2007] :

- Indicateur chimique (constituants du béton)
 - ✓ Quantité de silice libérée par les granulats en fonction du temps (cinétique) ;
 - ✓ Bilan des alcalins équivalents ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{éq.}}$) actifs de la solution interstitielle ;
- Indicateur global et macroscopique (béton durci) : expansion d'éprouvette en béton.

Les indicateurs de durabilité spécifiques à l'attaque sulfatique sont de deux types différents [Ndzana et Tchoumi 2007] :

- Indicateur chimique (constituants du béton)
 - ✓ Bilan des sulfates équivalents ;
 - ✓ Nature des hydrates ;
- Indicateur global et macroscopique (béton durci) : stabilité dimensionnelle des éprouvettes de béton.

II.4 Conclusion du chapitre

Il est souvent très difficile d'établir un diagnostic simple et univoque compte tenu des multiplicités des types d'agressions chimiques d'une part, et des similitudes des dégradations constatées d'autre part. On peut toutefois distinguer les attaques chimiques d'après les manifestations et les caractéristiques de chaque attaque : la corrosion par exemple est induite soit par la carbonatation ; soit par la pénétration d'ions chlorure.

Les autres attaques telles que la réaction alcali-granulat (due aux granulats réactifs) ; l'attaque par les sulfates et par l'eau de mer engendrent une fissuration et un gonflement mais chaque attaque a ses conséquences et ses manifestations qui la caractérisent. Donc la connaissance du milieu ou de l'environnement où se trouve l'ouvrage participe à l'identification de l'attaque.

La durabilité pose un problème lorsque la résistance d'un matériau à la dégradation est moins grande que celle qui est nécessaire pour s'opposer à l'agressivité du milieu dans lequel il doit fonctionner. Par exemple, l'acier ne sera pas affecté par la corrosion dans un environnement sec et sans sel, mais il le sera en présence d'humidité et d'ions chlorure.

Pour choisir le matériau qui convient, il faut connaître les conditions environnementales auxquelles il sera exposé de manière à pouvoir prévoir son comportement et à en tenir compte au stade de la conception.

Références Bibliographiques

- [Benouis 2013]** Benouis A., Diagnostic des réparations minces des ouvrages en béton par les ultrasons, rapport du projet pnr, laboratoire de génie civil et d'hydraulique, université de Guelma, Algérie, 2013.
- [Bensafir 2010]** Bensafir S., Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs mémoire de master, université de Mascara, Algérie 2010.
- [Cimbéton 2004]** Bétons et ouvrages et d'art : la durabilité des bétons T48, Collection Technique Cimbéton, 2004.
- [Dreux et Festa 1998]** Dreux et Festa Nouveau guide du béton et de ses constituants, ed. Eyrolles, 1998.
- [Itmaizeh 2016]** Itmaizeh E., Pathologie de structures en béton armé, mémoire de master, université de Tébessa, Algérie, 2016.
- [Kassoumi 2009]** Kassoumi L., Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers, mémoire de magister, l'ENSET d'Oran, Algérie, 2009.
- [Kassoumi et al. 2007]** Kassoumi L., AIT ELAAL M., OUALI A., ESSAMOUD R., GHAFIRI A., Approche performantielle et prédictive de béton des ouvrages d'art sur la base d'indicateurs de durabilités, université Hassan II, Maroc, 2007.
- [Kerbouche 2009]** Kerbouche A., Influence des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des mortiers, mémoire de magister, l'ENSET d'Oran, Algérie, 2009.
- [Kherif 2019]** Kherif Y., Application pratique de la norme NF EN 206-1 sur les ouvrages d'arts, mémoire de master, université de Biskra, Algérie, 2019.
- [Lesueur 2004]** Lesueur V., Etude du mécanisme d'action du mono-fluor phosphate de sodium comme inhibiteur de la corrosion des armatures métalliques dans le béton, thèse de doctorat, Université Paris 6, France, 2004.
- [Ndzana et Tchoumi 2007]** Ndzana A. et Tchoumi S., Réhabilitation des ouvrages en béton armé dégradés par la corrosion des armatures, DIPET2 (Diplôme des Professeurs des lycées d'Enseignement Technique 2ème grade), Génie Civil, Option : Bâtiment et Travaux, université de Douala (Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique) ENSET, Cameroun, 2007.
- [Nguyen 2007]** Nguyen T., Modélisations physico-chimiques de la pénétration des ions chlorures dans les matériaux cimentaires, thèse de doctorat, Ecole national des ponts et chaussées, Paris, France, 2007.
- [Oualit 2009]** Oualit M., Indicateurs de durabilité du béton dans le contexte Algérien, mémoire de magister, université de Boumerdès, Algérie, 2009.
- [Olivier 2008]** Olivier J. P., Durabilité des bétons, Presse de l'école nationale des ponts et chaussée, France, 2008.

Références Nétographiques

[Net-1] Principales agressions et attaques du béton

http://www.cotita.fr/IMG/pdf/02GASSER141022_Agressions_attaques_beton_approche_performantielle_ENPC.pdf

Consulté le 15/04/2020

[Net-2] La pathologie du béton

https://www.experts-cebtpi.org/uploads/event/file/16/Pathologieb_ton07112016.pdf

Consulté le 15/04/2020

[Net-3] La carbonatation du béton

<http://www.pmsa.ch/fr/specialites/carbonatation-du-beton>

Consulté le 15/04/2020

[Net-4] Action du gel et des sels de déverglaçage

<https://www.holcim.be/fr/causes-et-preventions-des-alterations-du-beton-action-du-gel-et-des-sels-de-deverglaçage>

Consulté le 18/04/2020

[Net-5] Les cycles de gel-dégel

https://coursexamens.org/images/Etudes_superieures/Ingeniorat_Genie_civil/4_annee/Beton_arme_et_precontraint/Durabilite/Chap2_3c.pdf

Consulté le 20/04/2020

CHAPITRE III : Le contrôle non destructif

Le troisième chapitre expose une synthèse sur les différentes méthodes de contrôle non destructif, plus particulièrement sur le contrôle par ultrason. Nous avons présenté dans ce chapitre une étude bibliographique approfondie sur la technique d'auscultation sonore (principe, différents types d'onde, limites, mode de propagation, atténuation ...).

III.1 Introduction

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, c'est pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps, plus souple d'évaluation de la qualité du béton.

Dans l'état actuel, les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les structures en béton ne permettent de prendre en compte que des essais destructifs sur des éprouvettes coulées en même moment ou sur des carottes prélevées de l'ouvrage. Toutefois ces méthodes ont beaucoup d'inconvénients qui proviennent du fait que : les résultats ne sont pas immédiatement disponibles ; le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage, par le fait même que la cure ou le compactage peuvent être différents ; d'autre part, les propriétés de résistance d'une éprouvette dépendent de sa grosseur et de sa forme [**Soutsos et al. 2009**]. Afin de contourner ces problèmes, une gamme d'essais non destructifs a été développée. Ces essais offrent un moyen pratique et fiable au contrôleur du béton dans le but d'apprécier la qualité réelle du béton in situ sans affecter le comportement structural des éléments [**Bin2002**].

Les méthodes de contrôle non destructif (CND) constituent l'une des voies adaptées pour établir et actualiser la connaissance d'un ouvrage au fil du temps. Ces techniques reposent sur des principes physiques bien connus (propagation d'ondes mécaniques ou électromagnétiques, mesures de champs électriques, etc.) et les sociétés de services en proposent aujourd'hui un emploi courant, mais de nombreux verrous subsistent [**Iyambo 2017**].

Ce chapitre concerne les méthodes de contrôle non destructif et plus précisément le contrôle par les ultrasons.

III.2 Les techniques du contrôle non destructif

Le Contrôle Non Destructif ou CND, appelé aussi Essais Non Destructifs (END) regroupe l'ensemble des procédés et techniques aptes à fournir des informations sur la qualité d'une pièce ou d'une structure sans l'altérer ou la détruire [**Net-1**].

Les contrôles non destructifs peuvent se classer en trois catégories [**Iyambo, 2017**] :

- ❖ Les méthodes de surface pour lesquelles l'anomalie est localisée en surface extérieure (examen visuel, ressuage, magnétoscopie, courant de Foucault).
- ❖ Les méthodes volumiques pour lesquelles l'anomalie est localisée dans le volume de la pièce (ultrason, rayonnement ionisant (radiographie)).
- ❖ Les méthodes complémentaires (thermographie, émission acoustique).

Au cours d'un examen non destructif, toutes les méthodes sont complémentaires les unes des autres, c'est-à-dire qu'on peut utiliser les unes à la suite des autres pour la confirmation du défaut [Lobo 2017]. Une description brève de ces méthodes est donnée ci-dessous :

➤ **Inspections visuelles**

L'inspection visuelle est le premier moyen de contrôle non destructif à la reconnaissance et au diagnostic d'ouvrages en béton armé. Elle est la plus simple et la plus immédiate des techniques d'auscultation non destructive d'une surface [Graybeal et al. 2002].

Elle permet de fournir immédiatement des données utiles et globales sur le degré de détérioration visible, comme l'écaillage des surfaces de béton, l'apparition de la fissuration et des défauts, la corrosion avancée des armatures, etc. [Taillandier et Sbartai 2013].

Les inspections visuelles peuvent être effectuées aujourd'hui par des appareils photographiques, ainsi que l'interprétation par des méthodes d'analyse d'images. La technologie a repoussé les limites de l'inspection visuelle par l'observateur humain. Dans certains cas, il est nécessaire de faire l'inspection visuelle par la photographie, par exemple dans une ambiance nucléaire ou un climat inclément. La topographie est aussi un moyen d'inspection, qui permet de suivre les déplacements ou les déformations d'un ouvrage. Mais, la seule inspection visuelle n'est pas en mesure d'évaluer la résistance ou les dégradations internes de la structure. À l'étape de pré-auscultation, l'inspection visuelle peut s'accompagner de l'emploi de techniques de CND simples, tels que le scléromètre et/ou l'ultrason [Kenai 2003].

➤ **Le ressuage**

Le ressuage (Penetrant Testing en anglais) est, selon les professionnels, la méthode de CND la plus ancienne car l'une de ses premières utilisations daterait de la fin du XIX^{ème} siècle. Cette méthode est par définition la résurgence d'un liquide (ou d'un gaz) d'une discontinuité dans

laquelle il s'était préalablement introduit au cours d'une opération d'imprégnation. Prolongement logique de l'examen visuel, le ressuage comporte quatre phases dont la première consiste à bien nettoyer la pièce à contrôler. Un liquide coloré et/ou fluorescent, appelé "pénétrant", est ensuite appliqué sur la surface à contrôler au cours de la deuxième phase. Il pénètre par capillarité à l'intérieur des discontinuités (fissures de corrosion, porosités, etc.), nécessitant une durée de pénétration avant l'étape suivante.

Durant la troisième phase, l'excès de pénétrant en surface est éliminé par lavage suivi d'un séchage. La surface peut alors être recouverte d'une couche mince de "révélateur" qui absorbe le pénétrant contenu dans les discontinuités, pendant cette quatrième phase, le révélateur fait "ressuer" le pénétrant, à la suite de quoi les indications de discontinuités apparaissent en surface. Le contrôle s'effectue en lumière blanche artificielle ou lumière du jour (ressuage coloré) ou sous rayonnement ultraviolet (UV-A).

Cette technique permet de détecter des discontinuités ouvertes et débouchant en surface sur tous matériaux métalliques, sur de nombreux matériaux minéraux (verre, céramique) et également sur certains matériaux organiques. Malgré la rigueur nécessaire à son utilisation, cette méthode a un faible coût de mise en œuvre et peut être considérée comme globale car elle peut contrôler toute la surface d'une pièce en une seule opération [Leleux 2012].

➤ **Courant induit ou de Foucault**

Cette méthode (ET : Electromagnetic Testing en anglais) consiste à créer, dans des matériaux conducteurs électriques, des courants induits par un champ magnétique variable, au moyen d'un capteur. Ces courants induits circulent localement dans le matériau et ont une distribution spatiale qui dépend du champ magnétique d'excitation, de la géométrie et des caractéristiques de conductivité électrique et de la perméabilité magnétique de la pièce examinée.

Pour ce faire, un excitateur externe est employé, souvent constitué d'une bobine parcourue par un courant alternatif. De plus, ces courants induits, parce qu'ils forment des boucles et sont à la même fréquence que le courant d'excitation, engendrent un champ magnétique alternatif de réaction sortant de la pièce à inspecter. Les défauts superficiels deviennent alors les lignes des courants de Foucault, et par la suite modifient le champ magnétique résultant. La variation du champ magnétique est enfin mesurée au moyen d'un élément sensible au champ magnétique alternatif, qui peut être une bobine ou un capteur de champ magnétique

Cette méthode est surtout utilisée pour détecter des défauts superficiels car les courants de Foucault ont tendance à se rassembler à la surface des corps conducteurs (effet de peau). Les courants de Foucault permettent également de déceler les variations de composition d'un alliage et même de mesurer des épaisseurs de revêtements [Leleux 2012].

➤ **Magnétoscopie**

La magnétoscopie (Magnetic particle Testing, en anglais) est l'une des méthodes incontournables du CND et aussi une des plus anciennes. Contrairement aux courants de Foucault, elle ne craint pas les effets de bord, et surtout elle ne se limite pas à un contrôle ponctuel.

La magnétoscopie consiste à aimanter la pièce à contrôler à l'aide d'un champ magnétique suffisamment élevé. En présence d'une discontinuité, les lignes du champ magnétique subissent une distorsion qui génère un « champ de fuite », appelé également « fuite de flux magnétique ». Un produit indicateur (composé d'une poudre magnétique très fine) est appliqué sur la surface à examiner pendant l'aimantation (technique simultanée) ou après aimantation (technique d'aimantation résiduelle). Le produit indicateur coloré et/ou fluorescent est attiré au droit du défaut par les forces magnétiques pour former des indications [Harrouach et Fedsi 2017].

➤ **Radiographies**

L'examen de la structure ou de la qualité interne d'un objet par radiographie consiste à le faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayons X ou γ selon la méthode) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau sous forme d'une image sur un récepteur approprié [Net-2]. On distingue parmi ces méthodes la gammagraphie, la radiographie et la radioscopie [Roennelle et al. 2005].

L'application de ces techniques concerne tous les types de structure, et les différents matériaux de construction tels que le béton, le béton armé, le béton précontraint, la pierre, les métaux, etc. À ce jour, la radiographie industrielle est souvent utilisée à l'aide de films positionnés à la face opposée de la surface auscultée [Nguyen 2014].

➤ **Ultrasons**

Les ultrasons sont des ondes sonores qui se propagent dans les milieux élastiques. Des modifications locales du milieu parcouru (fissures, défaut de compacité, ...) engendrent des perturbations dans la propagation de l'onde. Le contrôle par ultrasons a donc pour principe

d'analyser, à l'aide d'instruments de mesure appropriés, les modifications apportées à la progression des ondes sonores. Les vitesses de propagation des ondes étant grandes (5850 m/s en ondes longitudinales et 3250 m/s en ondes transversales pour l'acier) et les distances à contrôler faibles (de quelques dixièmes à quelques centaines de millimètres), les échos de défaut ou de fond sont donc très proches de l'écho d'émission (quelques microsecondes) [Messaoud 2019].

De plus, le contrôle par ultrasons est une technique souvent utilisée en raison de la grande facilité apparente de mise en œuvre et de sa capacité à prospecter une structure en profondeur.

➤ **Thermographie infrarouge**

Dans le domaine du contrôle non destructif d'ouvrages, sont émergentes. L'apparition récente de la thermographie infrarouge (TIR) a permis aux méthodes thermiques de s'immiscer dans le domaine de l'auscultation des ouvrages [Sirieix et al. 2005]. Il s'agit alors de mesurer la réponse d'un ouvrage aux variations de températures naturelles ou artificielles. Les mesures sont effectuées dans le domaine spectral de l'infrarouge dit moyen, entre 2 et 15 μm [Gaussorgues 1999].

Les techniques de thermographie infrarouge sont classées par la nature de source thermique en deux groupes principaux : la thermographie infrarouge passive et la thermographie infrarouge active.

➤ **Emission acoustique**

Le contrôle par émission acoustique (EA) est une méthode capable de surveiller l'endommagement en temps réel dans les composites [Yamaguchi et al. 1991, Ono 1994]. La technique d'émission acoustique est une technique très prometteuse à laquelle on accorde de plus en plus d'attention que ce soit pour le suivi de l'intégrité de structures en service ou pour l'étude des mécanismes de rupture.

L'émission acoustique est selon la norme française AFNOR, «un phénomène de création d'ondes élastiques transitoires résultant de micro déplacements internes dans un matériau » [Roget 1988, Jacquesson 2000]. La source de ces ondes élastiques étant le matériau lui-même. Lorsqu'il est sollicité, une partie de l'énergie emmagasinée est alors dissipée créant des micro-déplacements de matière dont une fraction se retrouve sous la forme d'ondes élastiques : c'est l'émission acoustique. Lorsque ces ondes élastiques atteignent la surface, on

peut les détecter grâce au capteur piézo-électrique. Ainsi, on peut détecter une fuite dans un conduit, et même localiser le défaut.

Dans certains cas [Laksimi et al. 1999, Dalmas et al. 2001], le signal acoustique obtenu est audible, et l'on parle alors du "cri du matériau", le plus connu en émission acoustique étant le "cri de l'étain". Ainsi en écoutant le matériau, on peut suivre son endommagement.

III.2.1 Avantages des essais non destructifs

Leurs avantages par rapport aux autres peuvent être résumés comme suit [Djebri 2006] :

- Essai d'une construction sans la détruire, ni nuire à sa capacité de service.
- Possibilité d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques.
- Supplément d'informations de caractère local, sous forme de données se rapportant à un grand volume de matériau, donc possibilité d'obtenir un tableau plus complet de l'homogénéité du matériau dans l'ouvrage.
- Économie de matériaux, de temps et d'outillages d'essai.

III.2.2 Inconvénients des essais non destructifs

Le principal désavantage des méthodes d'essais non destructives réside dans le fait qu'au stade actuel, ils ne peuvent pas fournir au constructeur des données suffisamment précises pour remplacer totalement les méthodes destructives ou, au moins, dans les principaux domaines d'application. Les incertitudes introduites par la composition des bétons peuvent avoir une influence importante sur les corrélations (vitesses, résistance, porosité, défauts...) [Benouis et al. 2007].

III.3 Les méthodes ultrasonores

L'inspection par ultrasons (UT) est l'un des procédés de contrôle non destructif (CND) les plus utilisés partout dans le monde. Ils se font au moyen d'un procédé acoustique, par lequel, à travers un capteur, des ondes sonores ultrasoniques sont émises vers des matériaux conducteurs de son, sur une plage de fréquences allant de 20 kHz à 50 MHz [Net-3].

Les ondes ultrasonores sont des vibrations acoustiques se propageant dans un milieu élastique (solide, liquide ou gaz) et dont la fréquence se trouve au-delà des fréquences audibles [Samia 2015]. On distingue trois catégories d'onde acoustique :



Figure III.1 : Les trois catégories d'onde acoustique [Samia 2015].

Les ultrasons sont une méthode simple et relativement peu coûteuse pour déterminer l'homogénéité d'un béton. Elle peut être utilisée dans le cadre d'un suivi de contrôle de qualité de la production qu'en auscultation d'ouvrage altéré. Cependant elle nécessite un étalonnage rigoureux, les corrélations sont souvent délicates [Malhotra 1991].

Les techniques ultrasonores sont largement mises en œuvre dans de nombreuses applications, parmi lesquelles [Lhermite 1990, Yeh et Cheng 2003] :

- détermination des propriétés intrinsèques des matériaux
- détermination des défauts microscopiques ou macroscopiques

Les caractéristiques ultrasoniques principales qui sont exploitées sont :

- la vitesse de propagation, qui est directement associée à la densité du matériau et ses propriétés élastiques,
- l'atténuation dans le matériau, qui est liée à la viscosité.

III.3.1 Principe de fonctionnement des ultrasons

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue.

L'appareil génère des impulsions ultrasoniques qui sont transmises au béton par transducteurs mis en contact avec la zone à évaluer. Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc. Des cristaux semblables sont utilisés dans le récepteur. Le temps de propagation de l'impulsion dans le béton est visualisé sur un afficheur digital [Djebri 2006].



Photo III.1 : Equipement à ultrasons [Benouis et Grini 2011].

L'appareillage comprend :

- Un générateur d'impulsions électriques.
- Un dispositif électronique de mesure de temps du parcours.
- Une paire de transducteurs.

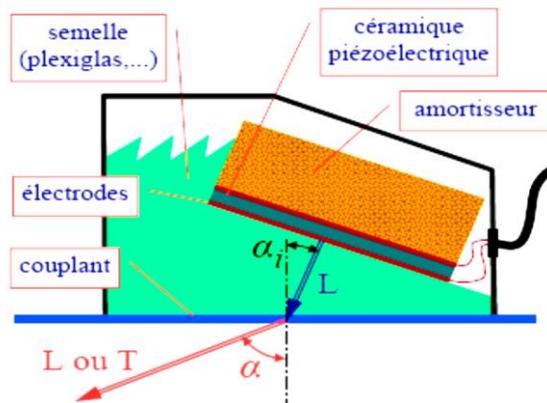


Figure III.2 : Schéma d'un transducteur à ultrason [Net-4].

Éléments constitutifs du transducteur [Net-4] :

- pastille céramique piézoélectrique (PZT : titanate-zirconate de plomb ; MBP : métaniobate de plomb ; ...),
- électrodes (décharges de 100 à 400 V),
- semelle fixe ou interchangeable, assurant la génération de l'onde (L ou T) sous l'angle voulu,
- amortisseur (mélange de résine et de poudre de tungstène) absorbant l'onde émise à la face arrière de la céramique, et limitant la durée de la vibration mécanique.

III.3.2 Mode de propagation et longueur du parcours des ultrasons

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester [Benouis et al. 2013] :

➤ **Mesure en transparence (directe)**

Elle est utilisée dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. L'émetteur et le récepteur sont placés sur les deux faces opposées de l'élément à ausculter. C'est la méthode la plus employée car un maximum d'énergie de l'impulsion est transmise puis reçue.

En transmission directe, la longueur de parcours est la distance entre les deux transducteurs.

➤ **Mesure en surface (indirecte)**

Cette méthode s'effectue principalement sur les dalles et éléments en longueur. Pour la réaliser, il faut placer l'émetteur et le récepteur sur la même face plane de l'élément à ausculter. L'émetteur reste sur un même point, tandis que le récepteur se déplace en effectuant à chaque fois une mesure. Ou alors on peut travailler avec plusieurs transducteurs récepteurs

En transmission indirecte ou de surface, il y a une certaine incertitude par rapport à la longueur exacte de la longueur de parcours. Il est dès lors souhaitable d'effectuer une série de mesures à différents espacements de transducteurs pour éliminer cette incertitude. Le transducteur émetteur sera placé en contact avec la surface du béton en un point **P** fixe et le transducteur récepteur sera déplacé en différents points alignés à des distances fixes. La pente de la meilleure droite passant par les points sera mesurée et relevée comme vitesse conventionnelle de propagation.

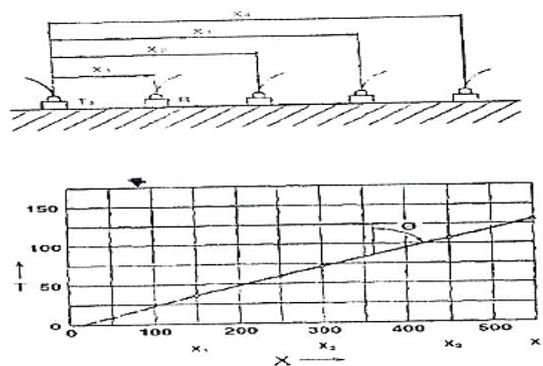


Figure III.3 : Vitesse de propagation déterminée en transmission indirecte ou de surface [Benouis et al. 2013].

➤ **Mesure semi-directe**

Dans cette mesure, l'émetteur et le récepteur sont placés sur deux faces perpendiculaires. On a recours à cette méthode lorsque l'ensemble de la structure n'est pas accessible. La distance séparant les 2 transducteurs ne doit pas être trop grande pour que l'onde ne s'atténue pas trop (difficulté à détecter le signal de l'impulsion).

En transmission semi-directe, il est généralement suffisant de déterminer la distance de centre à centre des transducteurs. La précision d'estimation de la longueur de parcours dépendra de la dimension des transducteurs comparée à la distance centre à centre.

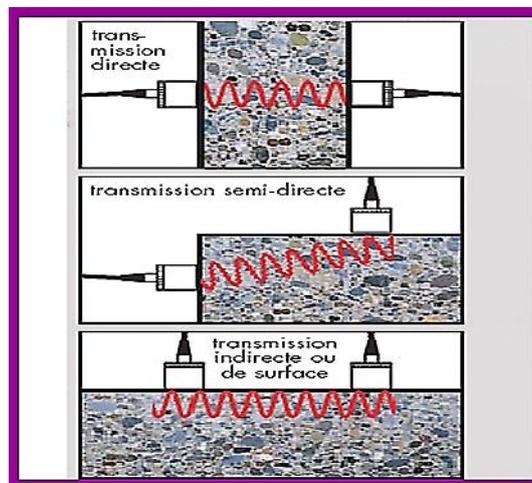


Figure III.4 : Position des transducteurs.

La vitesse de propagation en transmission directe et semi-directe sera calculée selon la formule :

$$V = \frac{L}{T} \quad (III.1)$$

Avec

V : vitesse conventionnelle de propagation, en km/s

L : longueur de parcours, en mm

T : temps de propagation en ms.

III.3.3 Facteurs influant sur les mesures des vitesses de propagation du son

La vitesse de propagation des ondes dans le béton est liée essentiellement à la masse volumique et au coefficient dynamique du béton comme l'indique l'équation suivante dans les normes en vigueur [Djebri 2006],

$$V^2 = \frac{E_d(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)\nu} \quad (III.2)$$

Où :

E_d est le module d'élasticité dynamique du béton

ρ est la masse volumique du béton

ν est le coefficient de poisson

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton. Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Cependant pour un granulats donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci, telles qu'un changement du rapport eau/ciment qui influe sur le module d'élasticité de la pâte [Sraidi et Harid, 2016].

Pour que la mesure de la vitesse du son soit reproductible et dépende essentiellement des propriétés du béton soumis à l'eau, il est nécessaire de prendre en considération les différents facteurs susceptibles d'influer sur la vitesse de propagation du son et sa corrélation avec différentes propriétés physiques du béton [Net-5] :

- ✓ Le type de ciment ;
- ✓ Le dosage en ciment ;
- ✓ La nature des granulats ;
- ✓ La granulométrie ;
- ✓ L'humidité du béton ;
- ✓ La maturité du béton ;
- ✓ Les adjuvants ;
- ✓ Température du béton (négligeable pour des variations inférieures à 30°C) ;
- ✓ Forme et dimensions des éprouvettes.

La vitesse de propagation peut être réduite de manière appréciable si la dimension latérale de l'éprouvette est inférieure à une valeur minimale. Cette réduction dépend du rapport entre la longueur d'onde et la plus petite dimension latérale de l'éprouvette. Elle est insignifiante si ce rapport est inférieur à l'unité. La norme [Norme EN 12504-4_2005] précise l'incidence des dimensions des éprouvettes sur la transmission de l'impulsion [Net-5].

Tableau III.1 : Incidence des dimensions des éprouvettes sur la transmission de l'impulsion [Net-5].

Fréquence du transducteur (kHz)	Vitesse d'impulsion dans le béton (en km/s)		
	$V_c = 3,50$	$V_c = 4,00$	$V_c = 4,50$
	Dimension latérale minimale admissible de l'éprouvette (mm)		
24	146	167	188
54	65	74	83
82	43	49	55
150	23	27	30

III.4 Propagation des ondes dans différents milieux

La propagation des ondes ultrasonores dans les milieux hétérogènes engendre de nombreux phénomènes qui contribuent à la diffusion ou à l'atténuation.

La propagation d'onde ultrasonore dans un milieu hétérogène tel que le béton manifeste clairement les phénomènes suivants : la dispersion, l'atténuation et la diffusion multiple. L'hétérogénéité du béton sera un paramètre très important à prendre en compte. Les longueurs d'onde utilisées étant du même ordre de grandeur que les granulats, et il y aura donc une interaction forte entre les ultrasons et les granulats [Benouis et al. 2013].

III.4.1 Les différents types d'ondes ultrasonores

Il existe trois types d'ondes dans un milieu élastique :

- ondes longitudinales (onde P),
- ondes transversales (onde S),
- ondes de surface.

Les ondes longitudinales et transversales sont aussi appelées respectivement ondes de compression (P-waves) et ondes de cisaillement (S-waves), et sont caractérisées par la direction du mouvement de la particule ; pour les ondes de compression la direction du mouvement de vibration des particules est parallèle à la direction de la propagation tandis que pour les ondes de cisaillement la direction du mouvement des particules est perpendiculaire à la direction de la propagation [Samia 2015].

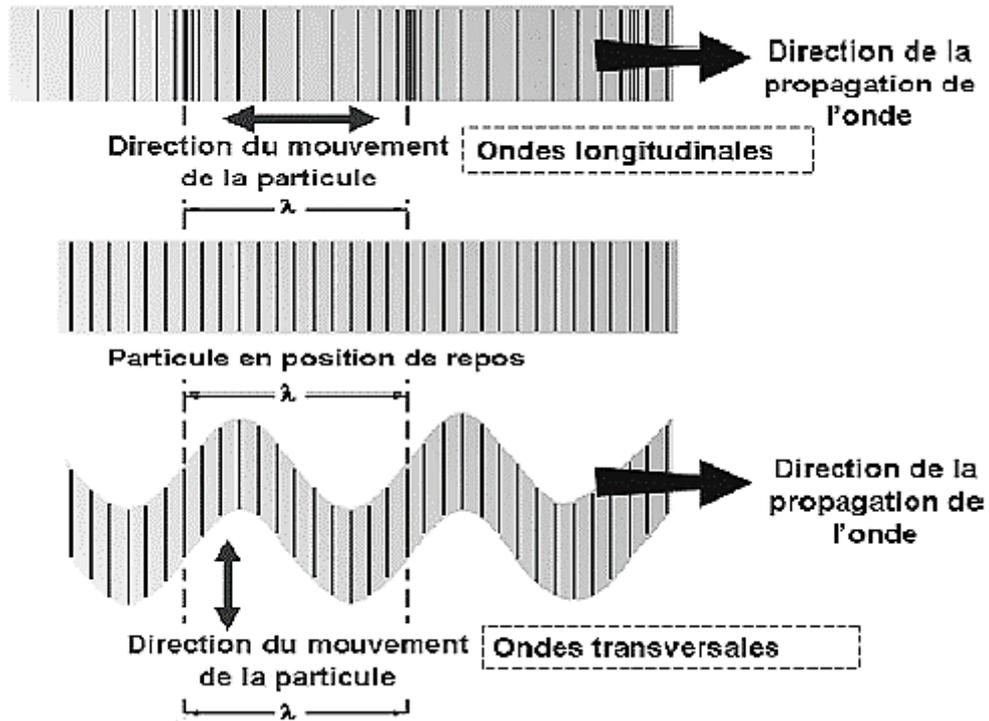


Figure III.5 : Polarisation propagation des ondes longitudinales et transversales [Marie 2006].

Les ondes de surface résultent de l'interaction d'ondes longitudinales et transversales avec une surface libre. Ces ondes sont très pratiques dans le cas 'in situ' où l'épaisseur du milieu n'est pas toujours connue. Les deux principaux types d'ondes de surface sont les ondes de Rayleigh et les ondes de Love. L'amplitude de ces ondes décroît rapidement avec la profondeur [Othmani 2013].

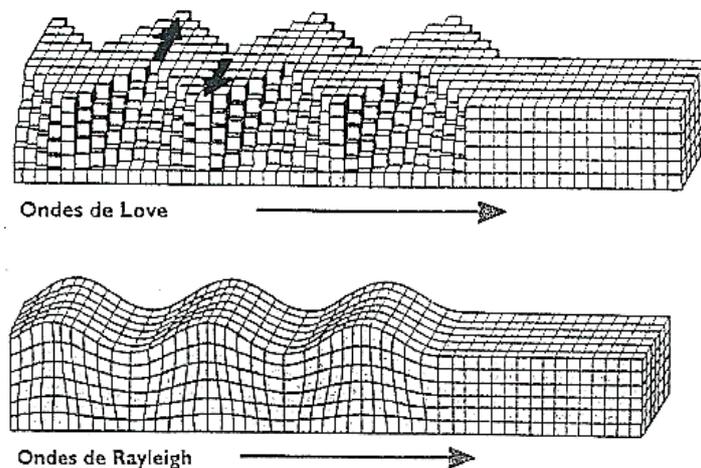


Figure III.6 : Propagation des ondes de Rayleigh et de love [Net-6].

Les ondes ultrasonores, vibrations élastiques de la matière, ont des propriétés liées aux caractéristiques élastiques du support matériel (solide, liquide ou gaz).

Dans les liquides et gaz (milieux de faible résistance au cisaillement) : les ondes ultrasonores sont essentiellement des vibrations longitudinales, les particules matérielles se déplaçant, par rapport à leur position d'équilibre, parallèlement à la direction de propagation de l'onde, engendrant des fronts de compression-décompression, eux-mêmes perpendiculaires à cette direction. Dans les solides, on a des vibrations longitudinales et des vibrations transversales (cisaillement) où les vibrations des particules s'exercent perpendiculairement à la direction de propagation [Net-7].

III.4.2 Vitesses de propagation des ultrasons

Les vitesses de propagation des ondes ultrasonores longitudinales V_L , transversales V_T et de Rayleigh V_R , en m/s, sont liées aux caractéristiques du matériau par les relations suivantes (théorie des milieux élastiques). Ces vitesses dépendent du module d'élasticité E , du coefficient de Poisson ν , et de la densité ρ (masse volumique) [Net-8] :

$$V_L^2 = \frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)} ; \quad V_T^2 = \frac{E}{2\rho(1+\nu)} ; \quad V_R = 0.9 V_T \quad (III.3)$$

Avec E (Pa) module d'Young ; ν coefficient de Poisson ; ρ (kg/m³) masse volumique.

Le tableau suivant donne quelques exemples de vitesses moyennes V_L ; V_T et V_R pour les matériaux couramment utilisés en CND.

Tableau III.2 : Vitesse acoustiques [Net-8].

Matériau	ρ (kg/m ³)	V_L (m/s)	V_T (m/s)	V_R (m/s)
air	1	330	-	-
eau	1000	1500	-	-
acier	7850	5960	3240	2900

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation permettent de déterminer les constantes élastiques par l'intermédiaire du temps de transmission de l'impulsion. La méthode de détermination de la vitesse des ondes ultrasonores dans le béton est définie par les normes [EN 12504-4] et [ASTM C597].

III.4.3 Atténuation, absorption et diffraction des ondes ultrasonores

La propagation des ondes s'accompagne d'une atténuation géométrique liée à la géométrie du front d'onde. On appelle « atténuation », le phénomène d'affaiblissement de l'intensité du signal d'ondes se propageant dans un milieu atténuant. Cet affaiblissement se manifeste par une baisse d'énergie du signal le long de son trajet dans le milieu atténuant, ce qui entraîne une diminution de l'amplitude des ondes. L'atténuation ultrasonore suit la loi exponentielle de la forme :

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (\text{III.4})$$

Avec I : l'intensité à la distance x , I_0 : l'intensité initiale, α = le coefficient d'atténuation et x : la distance traversée par l'onde.

L'atténuation de l'énergie pendant la transmission d'ondes est due à plusieurs facteurs [Salah 2009] :

- L'absorption ultrasonore : conversion de l'énergie cinétique de la vibration en chaleur ;
- La dissipation : transformation d'énergie rayonnante en une autre forme d'énergie par interaction avec la matière.
- La diffusion : réflexion et réfraction à toute micro discontinuité de la matière (joints de grains, impuretés,...). Dans le cas du béton, c'est la cause principale de l'atténuation de l'onde. Elle est principalement attribuée aux multiples diffractions de l'onde sur les défauts (microstructure, répartition des granulats) et aussi à l'humidité.

Le phénomène de diffraction d'un faisceau d'ultrasons est également important à prendre en compte. Lorsqu'une onde interagit avec une hétérogénéité du matériau, elle subit de la diffraction. Dans le cas du béton, ces hétérogénéités peuvent être la porosité de la pâte de ciment, ou les inclusions comme le sable et les granulats. Elles sont très nombreuses, de natures différentes et de dimensions différentes. Elles influent sur la propagation à différentes échelles. On parle de diffraction multiple (Multidiffusion) [Bouaziz et Kharoubi 2014].

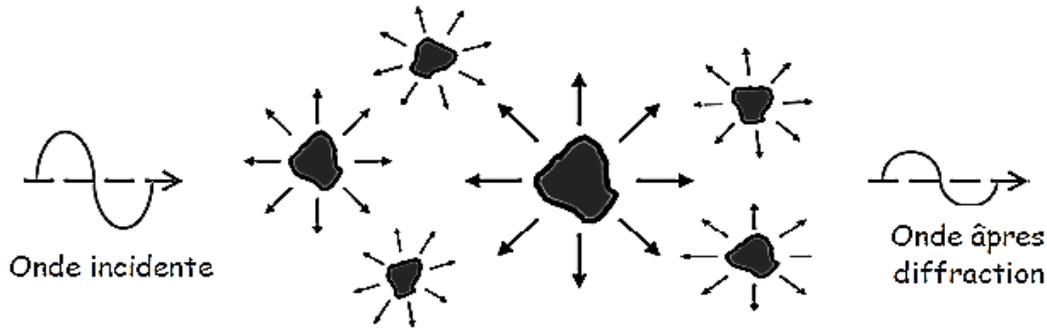


Figure III.7 : Multidiffusion dans le béton [Bouaziz et Kharoubi 2014].

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 , l'ouverture du faisceau peut être calculée par le biais de la formule [Ploix 2016] :

$$\sin \delta = K \lambda / D \quad (\text{III.5})$$

Avec λ est la longueur d'onde ; D : diamètre de la source circulaire, K : pouvoir de pénétration

Le faisceau sera donc plus ou moins ouvert selon la taille de la source, la fréquence de travail et le milieu de propagation (Figure III.8). On distingue alors deux zones de propagation : le champ proche, où le faisceau est droit et où l'amplitude oscille, et 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 [Ploix 2016].

La longueur d'onde λ d'une onde ultrasonore se déduit de la vitesse de propagation par la relation simple suivante :

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (\text{III. 6})$$

Où f est la fréquence de la vibration.

Près de la source ultrasonore, on peut démontrer que le faisceau est l'objet d'interactions vibratoires assez complexes donnant lieu à des maximums et des minimums d'énergie sur l'axe de propagation (Figure III.9 et III.10) ; il s'agit du champ proche ou zone de Fresnel dont la longueur est donnée par la relation [Marzouki et al. 2006]:

$$l = \frac{D^2}{4\lambda} \quad (\text{III.7})$$

Avec l : la distance limite du champ proche, D : le diamètre de la source. Ensuite, l'énergie devient monotone et le faisceau diverge selon un angle d'étalement 2θ tel que : $\theta \approx 1.22\lambda/D$

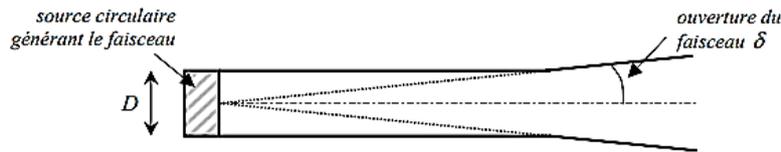


Figure III.8 : Propagation d'un faisceau émis par une source de dimensions finies [Ploix 2006].

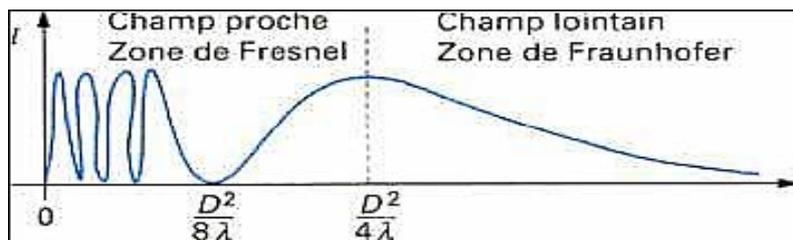


Figure III.9: Intensité acoustique sur l'axe du faisceau [Marzouki et al. 2006].



Figure III.10 : Distribution de l'amplitude du faisceau ultrasonore [Marzouki et al. 2006].

III.4.4 Détection des défauts

La recherche de défauts dans matériaux constitue une des préoccupations majeures du contrôle non destructif. Le principe de la détection d'un défaut consiste à exciter celui-ci et à recueillir sa réponse. Généralement les étapes de la détection du défaut quelle que soit la méthode employée sont les suivantes [Grini 2008] :

- Mise en œuvre d'un processus physique énergétique ;
- Modulation ou altération de ce processus par les défauts ;
- Détection de ces modifications par un capteur approprié ;
- Traitement des signaux et interprétation de l'information délivrée

Pour la détection des défauts par ultrasons, on peut citer deux modes d'examen : la méthode par transmission et la méthode par capteur de hauteur (pitch-catch).

A. Contrôle par transmission : Cette méthode consiste à placer deux transducteurs de part et d'autre de la pièce à analyser. Le transducteur émetteur émet une onde ultrasonore dans la pièce ; si un défaut existe au sein du matériau, l'onde ultrasonore est y réfléchi sélectivement. Si on place un second transducteur en regard de l'émetteur sur l'autre face de la pièce, et qui sert uniquement de récepteur, on recueillera une énergie plus faible en présence du défaut.

Cette perte d'énergie est d'autant plus importante que la dimension de l'hétérogénéité est grande. Quand un défaut intercepte le signal, une partie de l'énergie ultrasonore est arrêtée et par conséquent l'énergie parvenant au capteur récepteur est diminuée. De plus, quand un défaut est détecté, aucune information sur sa position ne peut être obtenue immédiatement, ce qui est extrêmement gênant dans le cas de l'analyse de nocivité des défauts [Messaoud 2019].

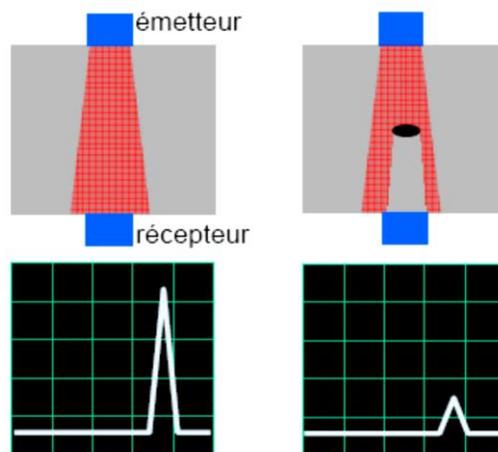


Figure III.11 : Techniques à capteurs distincts (transmission) [Net-4].

Interprétation : Sur la figure III.11 on observe :

- accès aux 2 faces de la pièce,
- détection par perte de signal (énergie plus faible : présence de défaut),
- insensibilité à l'orientation du défaut.

B. Contrôle par pitch-catch

Dans la technique du pitch-catch, le système comporte deux transducteurs, le premier émet les impulsions ultrasonores tandis que le second transducteur détecte les impulsions. Les transducteurs peuvent être alignés de différentes manières, par exemple en incidence normale ou en incidence oblique (à un certain angle d'inclinaison).

Les deux grandes catégories de techniques de capture de pitch sont directes et indirectes. Pour le tangage direct, le récepteur est placé là où le faisceau réfléchi est attendu s'il n'y a pas de défauts. La présence d'un défaut est détectée si le signal n'est pas détecté là où il est attendu ou si la puissance du signal est réduite. À l'inverse, pour la technique de pitch-catch indirect, le récepteur est placé là où le faisceau réfléchi est attendu si un défaut existe [Net-9].

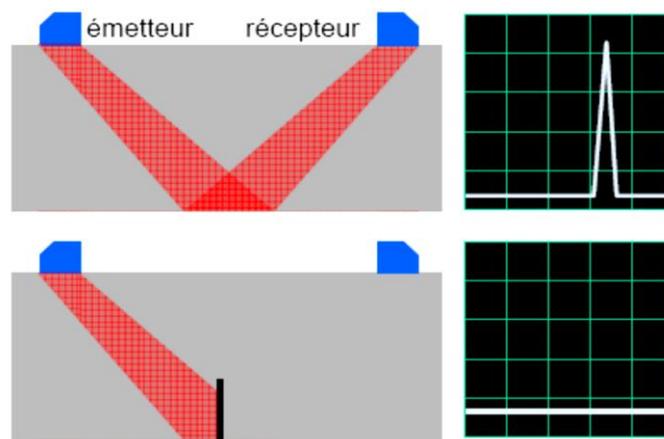


Figure III.12 : Techniques à capteurs distincts (pitch-catch) [Net-4].

Interprétation des résultats : sur la figure III.12 les résultats montrent :

- détection par perte de signal,
- insensibilité à l'orientation du défaut,
- sensibilité à la réflectivité de la paroi opposée.

III.5 Conclusion

Les contrôles non destructifs sont des essais très utiles pour vérifier l'intégrité structurelle des ouvrages en béton ayant été construits il y a plusieurs années ; et aussi ceux ayant subi un incident plus ou moins majeur comme un feu ou un séisme. Ils joueront un rôle encore plus exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton. Ceci étant possible grâce à l'avancée des techniques utilisées dans ce type d'essai qui permettra d'obtenir une meilleure précision des mesures et l'amélioration des appareillages en général.

Le contrôle par ultrasons est fréquemment utilisé car il présente de nombreux avantages tels que la facilité de mise en œuvre, la possibilité de travailler sur une seule face de la pièce à contrôler (pas besoin d'un accès à la deuxième face), et la capacité à traverser d'importantes épaisseurs de matière en fonction de la fréquence de travail. De plus, l'existence de relations entre la manière de propagation des ultrasons et les caractéristiques du matériau permettent sa caractérisation.

La science des ultrasons est aujourd'hui le fruit de l'union de l'électronique moderne et de l'acoustique. Grâce aux caractéristiques des ultrasons, il est possible d'obtenir de nombreuses informations sur les propriétés des matériaux.

Référence bibliographique

- [Benouis et Grini 2011] Benouis A. and Grini A., Estimation of concrete's porosity by ultrasound, S.D., Physics Procedia, 21, 53-58, 2011.
- [Benouis et al. 2007] Benouis A., Khaldi N., et Cherait Y., Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre université de Guelma, Algérie, 2007.
- [Benouis et al. 2008] Benouis A. et Khaldi N., Caractérisation des bétons par les ultrasons, Journées scientifiques du LMDC, université de Constantine 1, Algérie, 2008.
- [Benouis et al. 2013] Benouis A., Bouabid F., Benmalek L., Cherait Y., Nafa Z., Labidi N., Diagnostic des réparations minces des ouvrages en béton par les ultrasons, PNR, université de Guelma, Algérie, 2013.
- [Bin 2002] Bin Ibrahim A. N., Bin Ismail P., Forde M., Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2002.
- [Bouaziz et Kharoubi 2014] Bouaziz S., Kharoubi A., Diagnostic non destructif des réparations des ouvrages en béton, mémoire de master, université de Guelma, Algérie 2014.
- [Dalmas et al. 2001] Dalmas D., Benmedakhene S., Richard C., Caractérisation par émission acoustique de l'adhérence et de l'endommagement d'un revêtement : cas d'un revêtement WC-Co sur acier. Chemistry 4, Paris, Académie des sciences.2001.
- [Djebri 2006] Djebri N., L'évaluation de la qualité du béton in situ, mémoire de magister, université de Biskra, Algérie, 2006.
- [Gaussorgues 1999] Gaussorgues G., La thermographie infrarouge ; principes - techniques - applications, quatrième édition revue et argumentée, ISBN° 2-7430-0290-5, technique et documentation, Lavoisier Paris, 1999.
- [Graybeal et al. 2002] Graybal BA, Brent M, Polander D, Wsher G., Visual inspection of high way bridges, Journal of non-destructive evaluation, volume 21, issue 3, pp 67-83, 2002.
- [Grini 2008] Grini A., Contribution à la détermination de la porosité des bétons par les ultrasons, mémoire de magister en génie civil, université de Guelma, Algérie, 2008.
- [Harrouach et Fedsi 2017] Harrouach S., Fedsi Z., analyse non stationnaire des signaux ultrasonores' 'mémoire de fin d'études, université Mohamed Seddik ben Yahia – Jijel, Algérie, 2017.
- [Iyambo 2017] Iyambo J., Utilisation de l'ultrason dans les milieux agressifs pour les éléments en béton armés, mémoire de master, université d'Ain Témouchent, Algérie, 2016.
- [Jacquesson 2000] Jacquesson M., Mécanismes d'endommagement sous sollicitations monotone et cyclique de composites quasi-UD à fibres longues et à matrice base Aluminium : Apport de l'émission acoustique, thèse à Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2000, pp 231.
- [Kenai et Bahar 2003] Kenai S., Bahar R. Evaluation and repair of Algiers new airport building. Cement& Concrete Composites, 25, pp. 633–641, 2003.
- [Khaldi 2005]Khaldi N., Détermination des propriétés des bétons par les ultrasons,

mémoire de magister, université 8 mai 1945, Guelma, Algérie, 2005.

[Laksimi et al. 1999] Laksimi A., Benmedakhene S., Bounouas L., Monitoring acoustic emission during tensile loading of thermoplastic composite materials. International Conference on Composites Materials (ICCM12), CD-Rom, Paris, Juillet 1999

[Leleux 2012] Leleux A., Contrôle non destructive de composites par ondes ultrasonores guidées, générées et détectées par multiélément, thèse de doctorat en mécanique et ingénierie, université de Bordeaux, France, 2012.

[Lhermitte 1990] Lhermite T., Nouvelle méthode de mesure de vitesse ultrasonore-application à la détermination de l'ensemble des constantes élastiques des composites carbone / Epoxy unidirectionnels. 1er de congrès COFRED sur les essais non destructifs, Nice, 1990.

[Lobo 2017] Lobo N., Contribution à la caractérisation non destructive du béton armé par la méthode des ultrasons, thèse de doctorat, Shibaura institute of technology, Tokyo, Japan, 2017.

[Malhotra 2003] Malhotra V. M., & Carino N.J., Handbook on non destructive testing of concrete, CRC Press, Canada, 1991.

[Marie 2006] Marie-Aude P., Étude de l'atténuation des ondes ultrasonores. Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable auténitique, thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2006.

[Marzouki et al. 2006] Marzouki S., Tlili A., Saïdi M.N., Karoui M. F., cours contrôles non destructifs, ISET Jendouba, Tunisie, 2006.

[Messaoud 2019] Messaoud B., Analyse spectrale en contrôle non destructif par ultrasons, mémoire de master en électronique, université de Jijel, Algérie, 2019.

[Nguyen 2014] Nguyen N., Évaluation non destructive des structures en béton armé : Étude de la variabilité spatiale et de la combinaison des techniques, thèse de doctorat, université de Bordeaux, France, 2014.

[Ono 1994] Ono K., Trends of recent acoustic emission literature, journal of acoustic emission, 1994, vol 12, pp 177-198.

[Othmani 2013] Othmani S., Propagation des ondes ultrasonore dans les milieux solides hétérogènes - Application au cas du béton, mémoire de magister, université de Biskra, Algérie, 2013.

[Ploix 2016] Ploix M., Etude de l'atténuation des ondes ultrasonores : Application au contrôle non destructif des soudures en acier inoxydable austénitique, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Paris 2016

[Rocnelle et al. 2005] Rocnelle P., Oglaza C., Méthodes radiographiques d'évaluation non destructives de l'état d'altération des ouvrages en béton, chapitre B7, ISBN 2-85978-405-5, presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 2005.

[Roget 1988] Roget J., Essais non destructif l'émission acoustique. Mise en œuvre et application. Collection AFNOR-CETIM, CETIM Centre technique des industries mécaniques. 1988, pp 196.

[Sirieux et al. 2005] Sirieux C., Defer D., Amtczac E., Méthodes thermiques d'évaluation non destructives de l'état d'altération des ouvrages en béton, chapitre B5, ISBN 2-85978-

405-5, presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France, 2005.

[Salah 2009] Salah S., contrôle non destructif par ultrasons : Analyse et diagnostic, mémoire de master en électronique, université de Tébessa, Algérie, 2009.

[Samia 2015] Samia H., le contrôle non destructif des ouvrages en béton, évaluation de la résistance à la compression du béton sur site, thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie, 2015.

[Soutsos et al. 2009] Soutsos M., Bungey J., Long A., Tickel G., Interpretation of in-situ concrete strength test results, Department of engineering, the university of Liverpool, UK, 2009.

[Sraidi et Harid 2016] Sraidi S., Harid H., Contrôle de la qualité du béton par des essais non destructifs« Etude bibliographique », mémoire de master en génie civil, université de Guelma, Algérie, 2016.

[Taillandier et Sbartai 2013] Taillandier F., Sbartai ZM., Breyse D. Hiérarchisation de la maintenance d'un parc immobilier – Développement méthodologique et étude de cas. 31èmes Rencontres de l'AUGC, ENS Cachan, 29 au 31 mai, France, 2013.

[Yamaguchi et al. 1991] Yamaguchi K., Oyaizu H., Johkaji J., Acoustic emission : Current practice and future directions, American society for testing and materials, Philadelphia.1991.

[Yeh et Cheng 2003] Yeh H., Cheng J., Non destructive essai of metal damage : ultrasonics with a damage mechanics model, International journal of solids and structures, 2003, vol : 40, Issue : 26, pp 7285-7298.

Textes normatifs et recommandations

[ASTM C597] ASTM C597 : Standard test method for pulse velocity through concrete.

[NF EN 12504-4_2005] NF EN 12504-4 (2005) Essai pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son.

[Norme EN 13791] NF EN 13791 (2007) Assessment of concrete compressive strength in structures or in precast concrete products.

Références Nétographiques

[Net-1] Le contrôle non destructif

<http://www.intercontrole.com/FR/accueil-235/www-intercontrole-com-quest-ce-que-le-contrle-non-destructif-cnd.html>

Consulté le 22/04/2020

[Net-2] Contrôle non destructif - Radiographie

<https://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/controle/Chapitre-6/Section-1-1.html>

Consulté le 22/04/2020

[Net-3] Contrôle non destructif

<https://www.pce-instruments.com/f/t/fr/controle-non-destructif.htm>

Consulté le 23/04/2020

[Net-4] Ultrason - Sommaire

<http://fjehin.free.fr/LP/DOC/DossiersTechniques/CNDparUS.pdf>

<https://www.directindustry.fr/prod/drc-srl/product-161117-1926362.html>

Consulté le 23/04/2020

[Net-5] NF EN 12504-4

<https://fr.slideshare.net/morchedtounsi/117937110-en125044ultrasons-3>

Consulté le 25/04/2020

[Net-6] Prospection par onde de surface

<http://forumbachelor.free.fr/gma/GMA4/index.php?page=6>

Consulté le 25/04/2020

[Net-7] Contrôle non destructif

<https://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/controle/Chapitre-7/Sous-section-1-1-2.html>

Consulté le 25/04/2020

[Net-8] Contrôles ultrasonores – Le son

<https://slideplayer.fr/slide/3509772/>

Consulté le 17/05/2020

[Net-9] Directives pour l'inspection par ultrasons des goupilles de suspension

<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/04042/02.cfm>

Consulté le 17/05/2020

CHAPITRE IV : Corrélation entre les essais ultrasoniques et les propriétés du béton

Dans le quatrième et dernier chapitre, l'objectif est de faire le lien entre les mesures par ultrasons et les propriétés du béton, en faisant des corrélations simples et convenables reliant ces différents paramètres. Nous avons également évalué quelques pathologies du béton par la méthode des ultrasons.

IV.1 Introduction

Les préoccupations au sujet de la performance du béton à long terme conduisent à se focaliser sur les paramètres qui contrôlent la durabilité et les méthodes d'essai pour quantifier ces paramètres.

Le diagnostic des ouvrages, effectué pour prédire la durée de vie d'un ouvrage, repose sur la détection de zones d'altération, c'est-à-dire de zones dans lesquelles les propriétés (porosité, teneur en eau, fissuration...) se distinguent significativement des zones « saines ». La difficulté consiste donc, pour le paramètre recherché, à identifier dans quelle mesure les différences relevées entre la zone « saine » et la zone « altérée » traduisent des propriétés effectivement différentes. Fournir aux experts en diagnostic des outils plus fiables passe donc par l'identification des niveaux d'incertitude qui peuvent être attachés aux différentes mesures, par l'établissement des corrélations entre mesure et propriété recherchée, et par l'analyse du degré de signification de ces corrélations. Il est alors possible d'attacher à chaque estimation une certaine qualité et disposer d'un diagnostic de qualité [Net-1].

La mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le béton nous donne donc des indications sur l'homogénéité du béton, la profondeur des fissures ainsi que sur les résistances du béton, sa porosité et sa perméabilité en effectuant des corrélations entre ces paramètres et la vitesse des impulsions ultrasoniques [Timbo 2012].

Dans ce chapitre nous allons passer en revue des corrélations simples et convenables reliant les mesures des propriétés du béton (résistance à la compression, porosité, perméabilité, etc.) déterminées par des essais destructifs avec ceux trouvées par des essais non destructifs par ultrasons.

IV.2 Les résistances

La résistance du béton est l'un des facteurs les plus importants pour caractériser sa durabilité.

Les propriétés physiques importantes du béton qui influent sur la vitesse de propagation du son sont liées au type de granulat, à leurs proportions et à leurs propriétés physiques ainsi qu'à celles de la pâte de ciment, qui sont essentiellement liées au rapport eau/ciment initial et à la maturité du béton. D'autre part, la résistance du béton est davantage liée au rapport eau/ciment qu'au type de granulat et aux proportions de granulat et de pâte [Harid et Sraidi 2016].

Pour établir une corrélation, il s'agit essentiellement d'apprécier la résistance à la compression du béton par des mesures faites en transparence grâce à l'étalonnage résistance à la compression/vitesse de propagation du son préalablement réalisé. Ces relations permettent d'évaluer la résistance du béton d'un ouvrage avec une marge d'erreur acceptable pourvu que la composition du béton et les types de granulats ne varient pas. Ce type de corrélation peut être effectué afin de déterminer la résistance à la compression du béton d'un grand nombre d'éléments sans effectuer de trop nombreux carottages en vue de calculer la capacité portante de ces éléments. Cependant il est important de préciser qu'il n'existe pas de relation physique entre la résistance de compression du béton et la vitesse de propagation des ondes ; les essais permettent d'établir des corrélations empiriques. Donc il faut définir une corrélation particulière entre ces deux grandeurs pour chaque cas précis [Timbo 2012].

Généralement, la méthode de corrélation consiste à effectuer des essais d'écrasement sur différentes éprouvettes (prélevées in situ ou confectionnées au laboratoire) et à faire des mesures de vitesse d'ultrasons par méthode directe. Cependant pour obtenir des résultats satisfaisant ces mesures doivent être prises [Timbo 2012] :

- parmi une population, il faut au moins neuf couples de résultats d'essai (R_c/V_s), soit 3 prélèvements par gamme de vitesse (faible, moyenne et élevée),
- l'interprétation n'est valable que pour une étendue de vitesse ayant permis d'établir la corrélation : c'est-à-dire l'étendue de vitesse sur laquelle toutes les R_c ont été réalisées. Ainsi, il faut essayer de positionner un carottage sur l'élément ayant la vitesse moyenne la plus forte et un carottage sur l'élément ayant la vitesse la plus faible (hors valeurs aberrantes),
- Il faut réaliser les carottages au droit des mesures de vitesse des ultrasons.

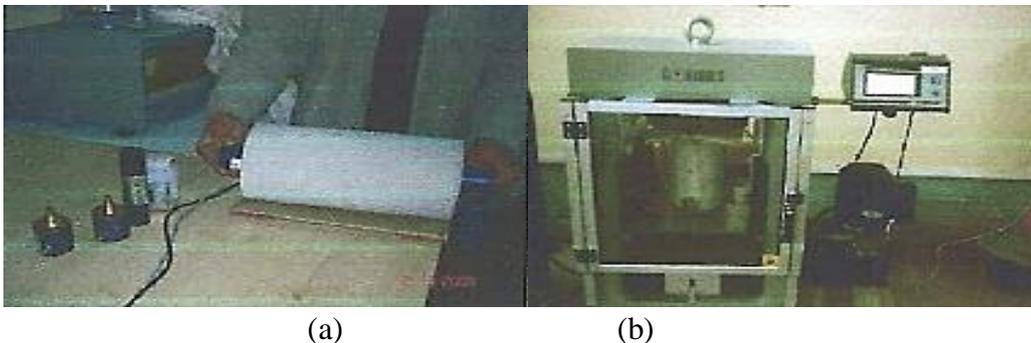


Photo IV.1 :(a) Mesure en transparence et (b) l'essai d'écrasement à la presse [Timbo 2012].

IV.2.1 Influence de la composition du béton sur la résistance

L'estimation de la résistance à la compression en fonction des vitesses ultrasoniques comporte de larges incertitudes si, on ne considère pas la variation des compositions et âges des bétons. Les vitesses des ultrasons augmentent avec le rapport eau/ciment, pour un niveau de résistance donné.

L'effet de la variation du rapport granulats fins sur granulats (S/S+G) sur la résistance à la compression dépend alors de la résistance et du rapport E/C du béton. Pour les bétons de résistance moyenne, la résistance augmente quand le rapport S/S+G augmente. Ceci s'explique par le fait que la résistance à la compression est contrôlée par la résistance de la pâte et la résistance de l'interface (pâte-granulats).

La densité du béton augmente avec le rapport S/S+G, ce qui conduit à moins de fissure à l'interface entre la pâte et les granulats (graviers).

Il a été constaté qu'à un niveau de résistance donné la vitesse des ultrasons dans le béton augmente avec le rapport S/S+G. La variation de la vitesse diminue quand la résistance à la compression augmente par les effets de l'âge ou de la diminution du rapport E/C [Benouis et Grini 2009].

IV.2.2. Quelques corrélations entre les vitesses ultrasoniques et les résistances

Dans cette partie nous allons présenter quelques corrélations issues d'anciennes études.

Des essais destructifs et non destructifs ont été effectués sur des éprouvettes à l'âge de 2, 7, 28 et 90 jours. Pour chaque éprouvette, l'essai aux ultrasons a été effectué en deux sens selon la méthode par transmission directe de telle façon que le sens de mesure du temps de transit soit perpendiculaire au sens de confection (photo IV.2), selon la norme [NF EN 12504-4].

Les corrélations proposées dans cette étude sont développées sur l'ensemble des différents bétons testés à différents âges. Pour trouver l'équation de régression qui s'applique le mieux à la détermination de la résistance du béton à l'aide des équations unies paramétriques exprimant les rapports $R_c = f(I)$ et $R_c = f(V)$ [Boukhelkhal et Kenai 2015] :

- R_c : résistance à la compression par écrasement,
- V : vitesse ultrasonique.



Photo IV.2 : Essais réalisés sur béton durci [Boukhelkhal et Kenai 2015].

La courbe de la figure IV.1 présente les résultats de la corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement «Rc» et les vitesses ultrasoniques «V» correspondants. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme exponentielle présentée par l'équation IV.1 avec un coefficient de corrélation $r = 0,926$ et une erreur type $s = 4,063$ MPa [Boukhelkhal et Kenai 2015].

$$R = 0,342 \exp (1,004 V) \quad (IV.1)$$

Avec **R** en MPa et **V** en km/s.

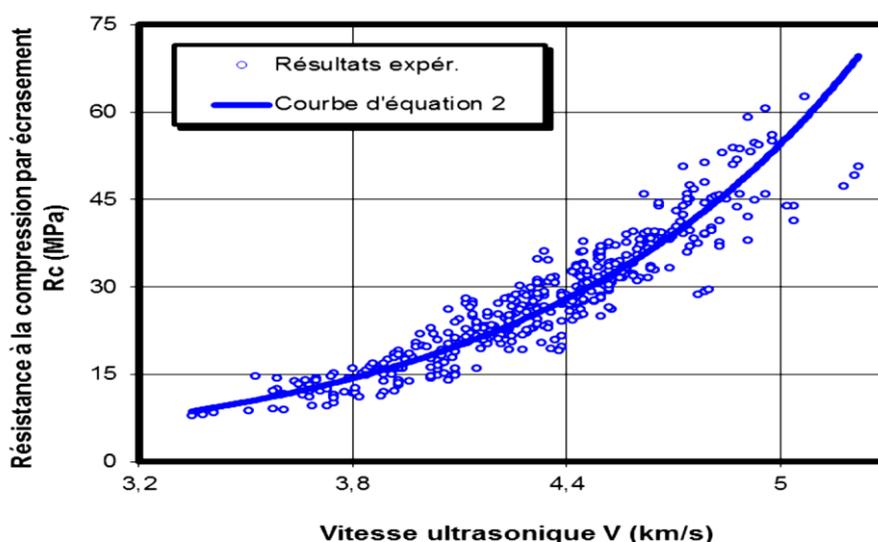


Figure IV.1 : Corrélation Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique [Boukhelkhal et Kenai 2015].

D'après la figure IV.1, on peut dire qu'il existe une bonne corrélation entre les résistances à la compression par écrasement et les vitesses ultrasoniques correspondantes pour l'ensemble des différents bétons examinés.

Dans une autre étude, différents rapports E/C et dosage en ciment ont été utilisés pour prédire la résistance du béton en fonction de la vitesse ultrasonique [Benouis et Boudjedra, 2020]. Les corrélations obtenues sont similaires à celles de l'étude précédente.

Suite aux résultats, et comme prévu, nous notons que la résistance à la compression du béton à 28 jours augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment et diminue avec l'augmentation du rapport E/C. Cette remarque s'applique également à l'UPV (vitesse d'impulsion ultrasonique) et sur la base des résultats expérimentaux présentés ci-dessus (tableau IV.1), une relation exponentielle entre l'UPV et le Rc28 et pour tous les bétons a été proposée :

$$R_{c28} = 0.3192 e^{0.0011UPV} (R^2 = 0,92) \quad (IV.2)$$

La figure (IV.2) et le tableau (IV.1) présentent les correspondances entre les vitesses des ultrasons et les résistances de différents bétons.

Tableau IV.1 : Résultats des différents essais.

Bétons	Dosages en ciment (Kg / m ³)	E / C	Rc ₂₈ (MPa)	Vitesse ultrasonique (m / s)
11	250	0,63	27,45 ± 0,55	4013,67 ± 35,53
12		0,74	15,93 ± 0,74	3652,33 ± 89,37
13		0,83	13,07 ± 0,38	3347,00 ± 38,73
21	350	0,50	37,93 ± 0,45	4306,33 ± 39,27
22		0,56	27,77 ± 0,48	4054,33 ± 23,67
23		0,65	25,40 ± 0,20	3641,00 ± 79,22
31	450	0,43	54,49 ± 0,81	4538,00 ± 36,86
32		0,48	42,87 ± 0,21	4358,33 ± 21,50
33		0,54	32,52 ± 0,53	4109,67 ± 16,17

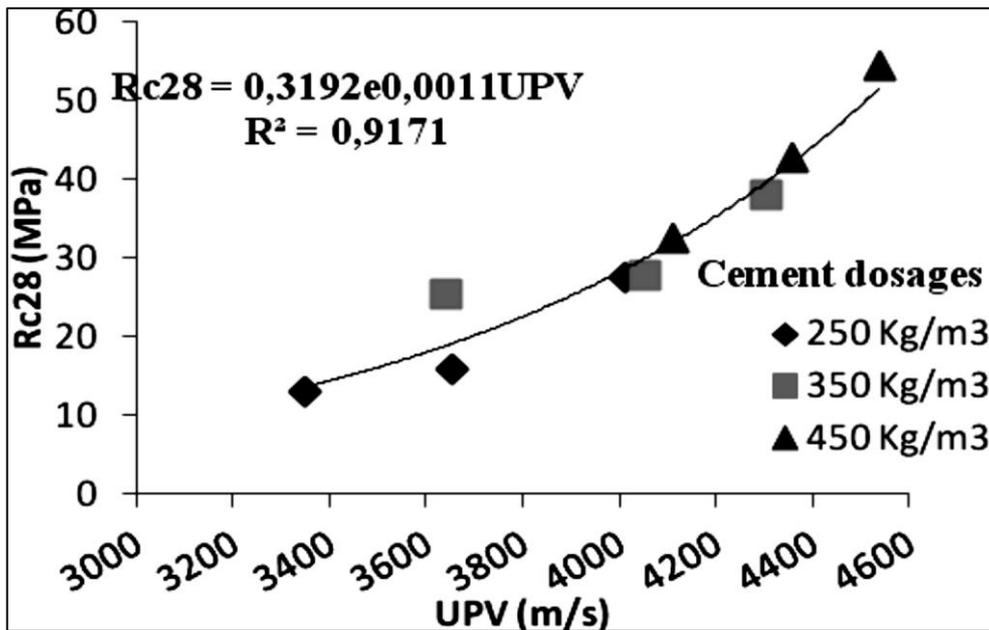


Figure IV.2 : Corrélation vitesse ultrasonique et résistance à la compression [Benouis et Boudjedra 2020].

IV.3 Les propriétés de transferts

IV.3.1 La porosité

Le béton est un matériau poreux. En d'autres termes, il comporte des pores ou vides. Ces pores sont déterminants pour la résistance et la durabilité du béton. La porosité est la conséquence naturelle de la quantité d'eau mise en plus de celle nécessaire à l'hydratation et des vides éventuels présents dans les granulats. Le désavantage de cette porosité se remarque à deux niveaux : sur la résistance mécanique et sur la durabilité du béton. La durabilité du béton dépend fortement de la porosité ; cela conditionne l'intensité des interactions du béton avec les agents agressifs [Net-2].

Généralement on mesure la porosité accessible à l'eau ; Il s'agit de mesurer le pourcentage des vides connectés avec la surface dans la masse de béton. Sur des ouvrages existants les essais de mesure de la porosité sont de nature « destructive » et nécessitent le prélèvement de carottes dans les ouvrages à qualifier.

IV.3.1.1 Quelques corrélations entre les vitesses ultrasonores et la porosité

Des études ont été proposées pour l'estimation de la porosité accessible à l'eau par les mesures des vitesses des ultrasons, [Hernandez et al. 2003] [Jeong et Hsu. 2002] [Goueygou 2003] mais elles requièrent une connaissance précise de la microstructure du béton.

Bien que ces corrélations sont réduites par l'influence de plusieurs facteurs extérieurs, les résultats mettent en évidence la sensibilité de l'onde ultrasonique à la variation de la porosité sous un certain seuil. Cette sensibilité laisse envisager la possibilité de quantifier les propriétés du transfert dans les matériaux à matrice cimentaire, notamment la porosité, à partir d'une mesure non destructive [Benouis et Grini 2011].

Il est possible d'homogénéiser le milieu en effectuant un nombre suffisant de mesures et en les moyennant [Timbo, 2012]. Pour des faibles valeurs de porosités la relation entre la vitesse de l'onde de cisaillement et la porosité peut être approchée par la forme linéaire suivante [Yaman et al. 2002] :

$$V_T \cong (1 - bP)V_{T0} \quad (IV.3)$$

Où P est la porosité du matériau, V_{T0} est la vitesse de l'onde de cisaillement du matériau à porosité nulle et b est un paramètre empirique.

Selon Shkolnik [Shkolnik, 1997] ce paramètre empirique b est constant et dépend du coefficient de Poisson du matériau à porosité nulle (ν_0) :

$$b_{Shko} = 15 \frac{1 - \nu_0}{7 - 5\nu_0} \quad (IV.4)$$

Si on suppose que le coefficient de Poisson varie en fonction de la porosité, l'équation (IV.3) devient sous la forme suivante :

$$V_T \cong (1 - b_T P)V_{T0} \quad (IV.5)$$

Avec b_T est un paramètre empirique.

La vitesse V_R de l'onde de Rayleigh est donnée en fonction de V_T et V_L par l'équation suivante [Royer 2007] :

$$\left(2 - \frac{V_R^2}{V_T^2}\right)^4 - 4 \sqrt{\left(1 - \frac{V_R^2}{V_L^2}\right)\left(1 - \frac{V_R^2}{V_T^2}\right)} = 0 \quad (IV.6)$$

Il est proposé une solution approchée de l'équation (IV.5). Cette approche définit une approximation de la vitesse de propagation de l'onde du Rayleigh en fonction de la vitesse transversale et du coefficient de Poisson du matériau [Royer 2007].

$$V_R \cong f(\nu)V_T \quad (IV.7)$$

$$f(V) = \frac{0.87 + 1.12v}{1 + v} \quad (IV. 8)$$

En substituant les équations précédentes on peut obtenir une formule approchée par la forme linéaire suivante :

$$V_R \cong (1 - b_R P) V_{R0} \quad (IV. 9)$$

V_{R0} est la vitesse de l'onde de Rayleigh du matériau à porosité nulle, avec

$$b = 15 \frac{1 - \nu_0}{7 - 5\nu_0} \approx 2 \quad (IV. 10)$$

Ce modèle prévoit donc une variation linéaire de la vitesse de l'onde de Rayleigh en fonction de la porosité, avec une pente b voisine de 2.

Comme il a été mentionné précédemment les vitesses des ultrasons dépendent du milieu traversé. Donc la vitesse des ultrasons dans le béton sera constituée de l'ensemble des vitesses à travers les différents constituants (granulats, matrice et pores contenant de l'eau ou de l'air) [Grini, 2008]. Les vitesses des ultrasons dans le cas des bétons chauffées à 105°C (évacuation de l'eau libre) pourront donc être corrélées à la porosité. Ces corrélations ont pris en considération l'effet du diamètre des transducteurs.

Les vitesses acquises par les transducteurs de grands diamètres ($D = 49,5$ mm) sont bien corrélées aux porosités que celles avec ses transducteurs de petit diamètre ($d = 7$ mm). Il a été constaté que pour les deux types de mesure le coefficient de corrélation approche de 1 pour les bétons courants et fluides (Figure IV.3.a et IV.3.b). Les corrélations deviennent moins précises en intégrant dans ces relations les bétons avec un rapport E / C moindre (Figure IV.4.a et IV.4.b). Ce qui semble confirmer l'inaptitude des ultrasons à qualifier les bétons hautes performances [Malhotra et Carino, 2003] [Neville, 2000] [Aitcin, 2001].

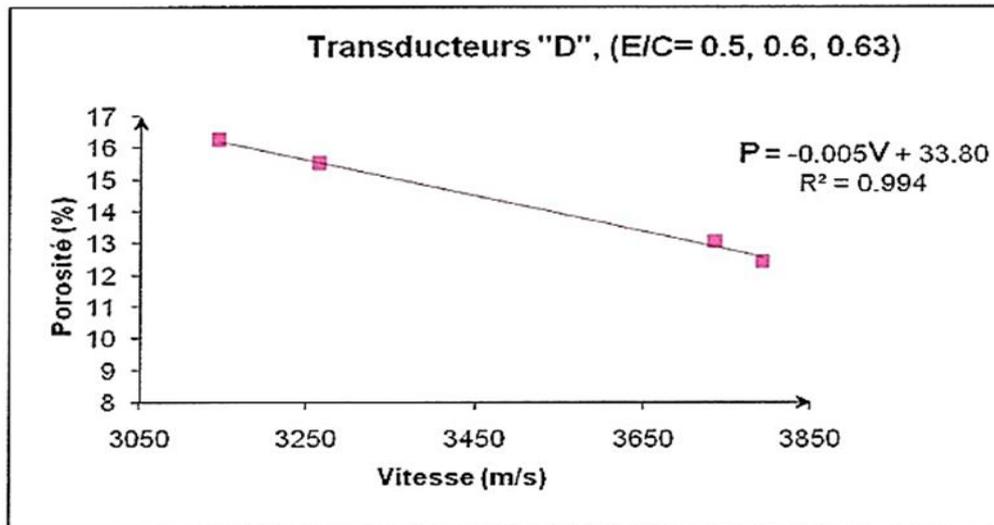


Figure IV.3.a : Porosité en fonction de la variation des vitesses ultrasonique (transducteur D, avec $E/C \geq 0.50$).

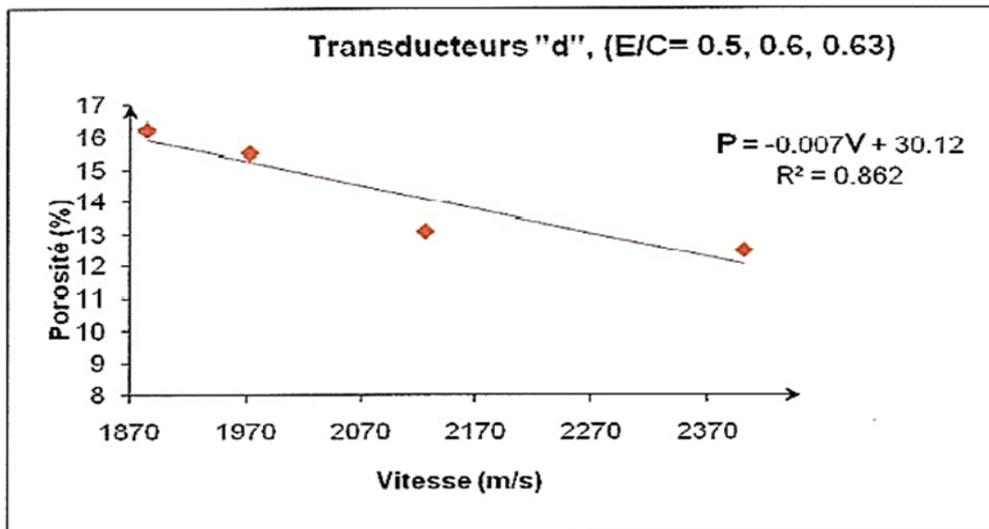


Figure IV.3.b : Porosité en fonction de la variation des vitesses ultrasonique (transducteur d, avec $E/C \geq 0.50$).

La porosité mesurée est la porosité accessible à l'eau. Il y a une porosité non accessible à l'eau, qui représente les pores non connectés. Cette porosité est beaucoup plus faible que la première mais lorsque la porosité accessible à l'eau diminue (pour $E/C < 0,5$) le rapport entre les deux types de porosité augmente ce qui peut influencer les relations "vitesse - porosité". [Benoui et Grini, 2009].

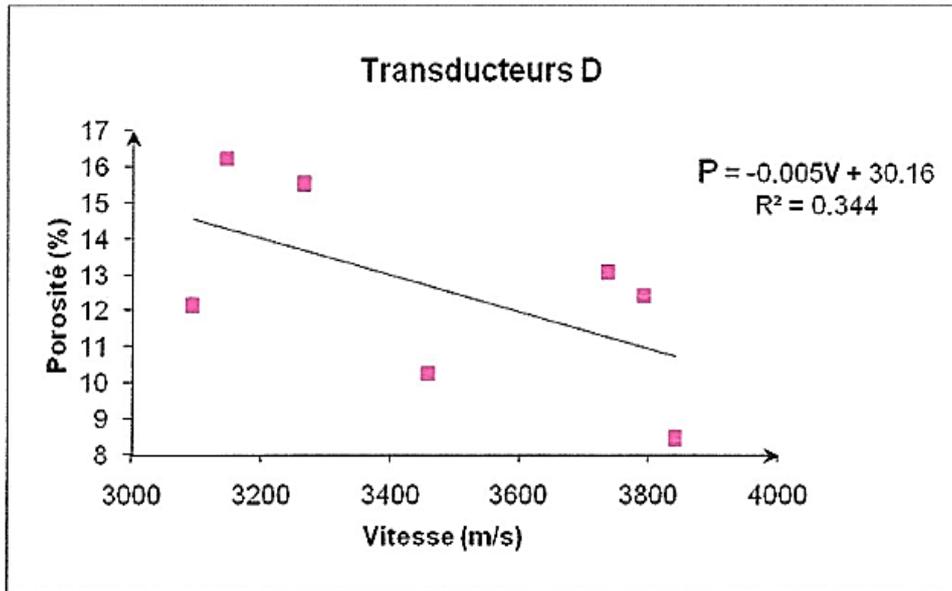


Figure IV.4.a : Relation entre les vitesses ultrasonique et la porosité de tous les bétons (transducteurs D, avec $E/C \geq 0.42$).

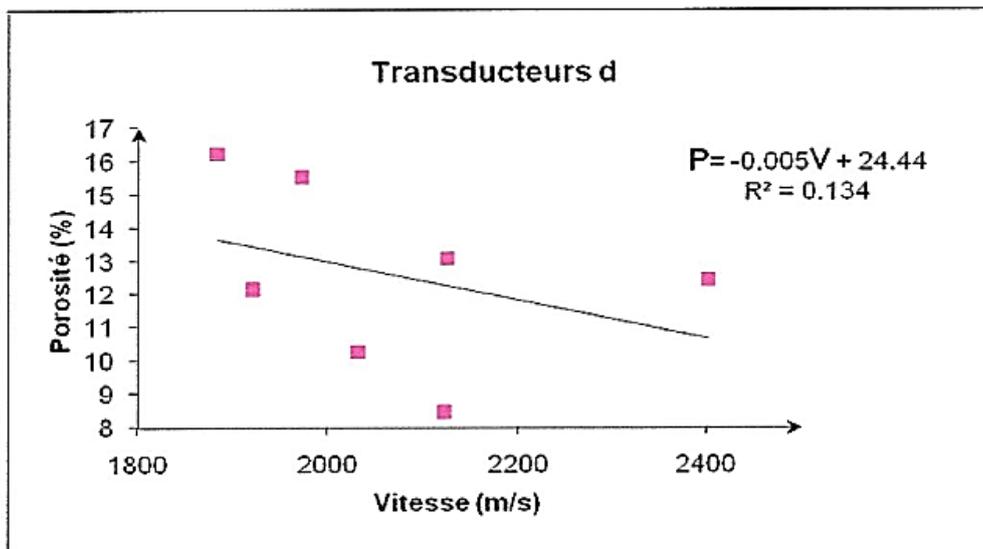


Figure IV.4.b : Relation entre les vitesses ultrasoniques et la porosité de tous les bétons (transducteurs d, avec $E/C \geq 0.42$).

D'autres études ont été faites pour estimer la porosité du béton, du mortier ou de la pâte de ciment, en utilisant des techniques ultrasoniques sous l'influence des composants du mélange du béton, des conditions de durcissement, des méthodes de mesure etc. [Benouis et Boudjedra2020] [Garnier et al, 2009] [Lafhaj et al 2006] [Hernandez et al, 2000] [Vergaraa et al, 2001].

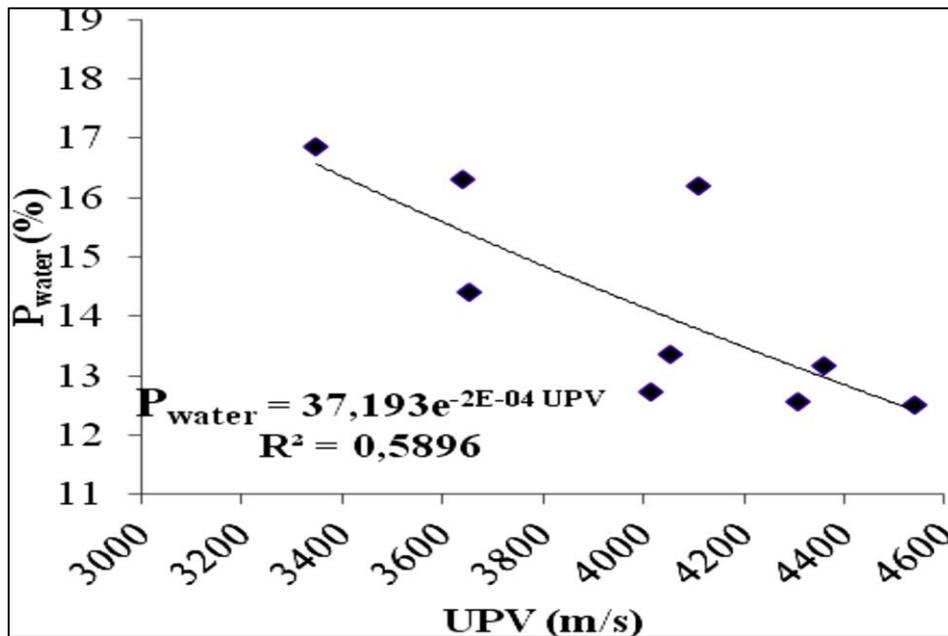


Figure IV.5 : Corrélations entre la vitesse d'impulsion ultrasonore et la porosité [Benouis et Boudjedra2020].

Comme observé, la porosité augmente avec le rapport W/C (E/C). La figure IV.5 montre une corrélation entre l'UPV et la porosité accessible à l'eau. On note que pour tous les bétons, il y avait une relation inverse entre l'UPV et la porosité accessible à l'eau P (eau). Des corrélations plus précises sont obtenues en ne prenant en compte que le rapport E / C en tant que variable (les dosages en ciment de chaque béton sont évalués individuellement) avec un coefficient de corrélation R^2 supérieur à 0,94. Cependant, cette corrélation devient moins précise en intégrant tous les dosages de ciment ($R^2 = 0,59$), la corrélation relativement faible observée est due au fait que les vitesses mesurées sont sensibles à des facteurs non contrôlés [Benouis et Boudjedra2020].

IV.3.2 La perméabilité

La perméabilité traduit l'aptitude du matériau béton à se laisser traverser par un fluide liquide ou gazeux sous l'effet d'un gradient de pression. Elle est la propriété la plus importante du béton régissant sa durabilité à long terme [Banthia et al 2005].

Généralement, la perméabilité aux gaz des bétons est considérée comme un indicateur majeur de la durabilité des ouvrages en béton armé, car elle régit la pénétration d'agents agressifs gazeux, comme le dioxyde de carbone ainsi que le transfert de vapeur d'eau liée au séchage du matériau [Caré et Derkx 2011].

Plusieurs travaux de recherche ont été menés pour étudier la relation entre la perméabilité du béton et les propriétés ultrasonores des ondes acoustiques. Ces études ont mis en évidence la sensibilité des paramètres de propagation à la structure poreuse du béton. Cette méthode permet de mesurer le temps de propagation d'une impulsion ultrasonique traversant le béton [Soltani 2008] [Chekroun 2008].

IV.3.2.1 Influence du rapport E/C et le degré de cure sur la perméabilité

Le rapport E/C, en raison de son influence sur la structure du réseau de pores capillaires, exerce une grande influence sur la perméabilité à l'air. Plus le rapport E/C est important, plus il y a de pores. Néanmoins, étant donné que ce qui contrôle la perméabilité du béton est plus la connectivité du réseau de pores que le volume directement, l'influence du rapport E/C sur la perméabilité est basée plus particulièrement sur le fait que plus ce rapport est grand et moins la structure du béton est segmentée, d'où une plus grande facilité pour un fluide de traverser le matériau. L'influence du rapport E/C sur la perméabilité reste néanmoins difficilement quantifiable étant donné que d'autres paramètres tels que la composition du ciment, les caractéristiques des granulats, influencent également la perméabilité [Desmettre 2011].

En ce qui concerne l'influence du degré d'hydratation, plus celui-ci et l'âge du béton sont élevés, plus la porosité diminue. En effet, plus la réaction d'hydratation des grains de ciment est avancée et plus les hydrates se forment, éliminant progressivement les espaces entre les grains. La structure globale du béton devient alors moins continue et contribue à une diminution de la perméabilité du béton. La perméabilité diminue donc avec l'âge du béton (Tableau IV.2).

Tableau IV.2 : Diminution de la perméabilité en fonction de l'âge [Ollivier et al. 1995].

Âge (jours)	Coefficient de perméabilité (10^{-13} m/s)
Etat frais	20 000 000
5	4 000
6	1 000
8	400
13	50
14	10

Cette diminution est assez rapide au jeune âge (dû à la segmentation du réseau poreux) puis ralentit par la suite [Ollivier et al 1995].

Les figures IV.6.a et IV.6.b illustrent la variation de la perméabilité à l'air en fonction du rapport E/C pour deux modes de conservations, à l'air libre et dans l'eau. Les résultats montrent une variation quasiment linéaire entre la perméabilité à l'air et le rapport E/C. On note une augmentation importante de la perméabilité pour les bétons conservés dans l'eau pour E/C variant de 0.65 à 0.70 (bétons fluides). Les bétons conservés à l'air libre ont présenté des coefficients de corrélations meilleures (proche de 1) que les bétons conservés dans l'eau. La perméabilité des bétons conservés à l'air libre est plus importante que celle des bétons conservés dans l'eau [Benouis et Mehamdia 2015].

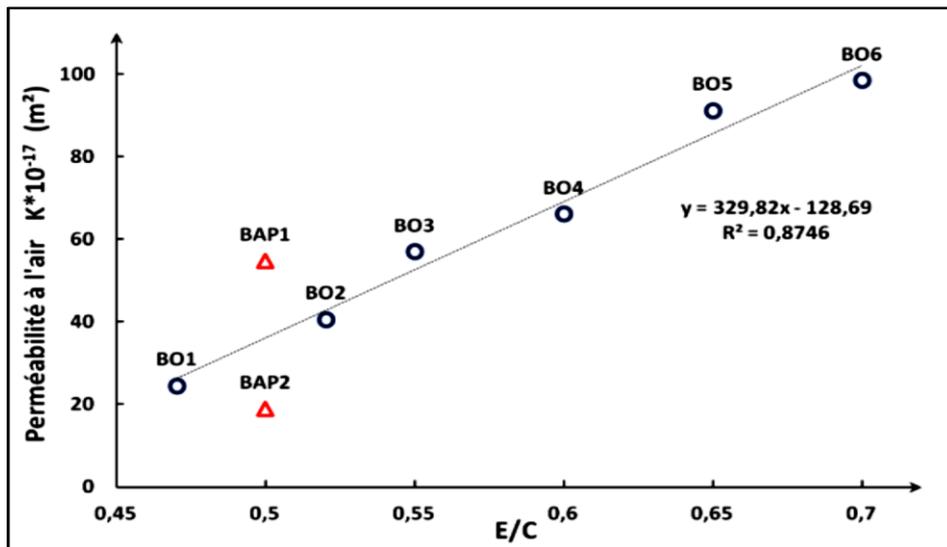


Figure IV.6.a : Evolution de la perméabilité à l'air (K) en fonction du rapport E/C (Bétons conservés à l'air libre).

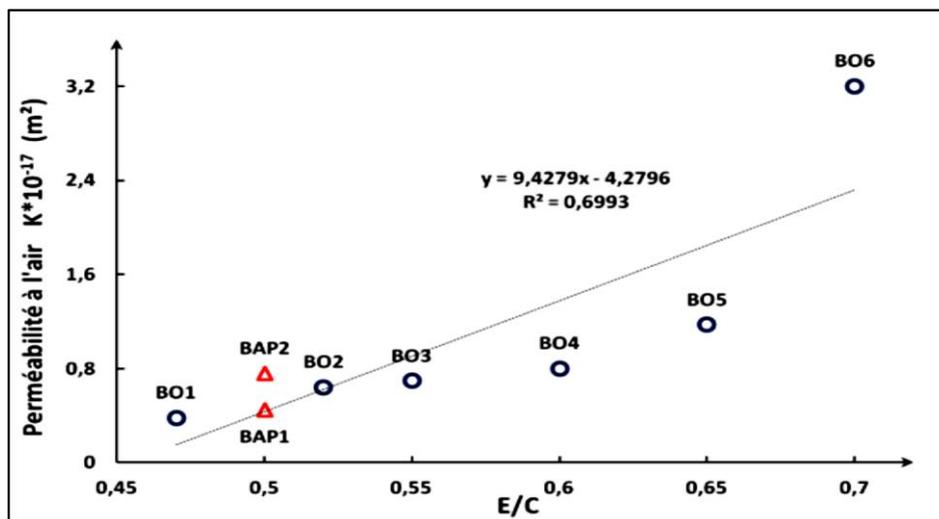


Figure IV.6.b : Evolution de la perméabilité à l'air (K) en fonction du rapport E/C (Bétons conservés dans l'eau).

Selon Ohdaira et Masuzawa [Ohdaira et Masuzawa 2000] et Vergara et al. [Vergara et al. 2001], la dépendance de la perméabilité à la porosité et à la teneur en eau est très significative. En effet, la perméabilité ne dépend pas seulement de la porosité mais aussi de la tortuosité, de la surface spécifique, de la distribution de la taille des pores et de la connectivité des pores.

IV.3.2.2 Quelques corrélations entre les vitesses ultrasonores et la perméabilité

Mehamdia et Benouis [Benouis et Mehamdia, 2015] ont estimé la perméabilité à l'air par des mesures des vitesses ultrasonores des ondes de surface (ondes de Rayleigh) pour différentes compositions du béton (études réalisées sur six bétons ordinaires et deux bétons autoplaçants). Les figures IV.7.a et IV.7.b montrent une augmentation de la vitesse des ondes de surface avec une diminution de la perméabilité à l'air, ceci est valable pour les deux états hygrométriques (dans l'eau et à l'air libre). Les résultats relèvent une corrélation du type linéaire entre les vitesses des ultrasons et la perméabilité à l'air, cette corrélation est plus fiable dans les bétons ordinaires ($R^2=0.87$ et $R^2=0.82$) pour les deux modes de conservation. [Panzer et al. 2008] et [Lafhaj et al. 2006] ont réalisé des mesures de vitesse des ultrasons sur des bétons de différentes gammes de saturation (saturation complète, partielle et sec) et ont abouti à une diminution linéaire des vitesses des ondes ultrasonores avec l'augmentation de la porosité et de la perméabilité.

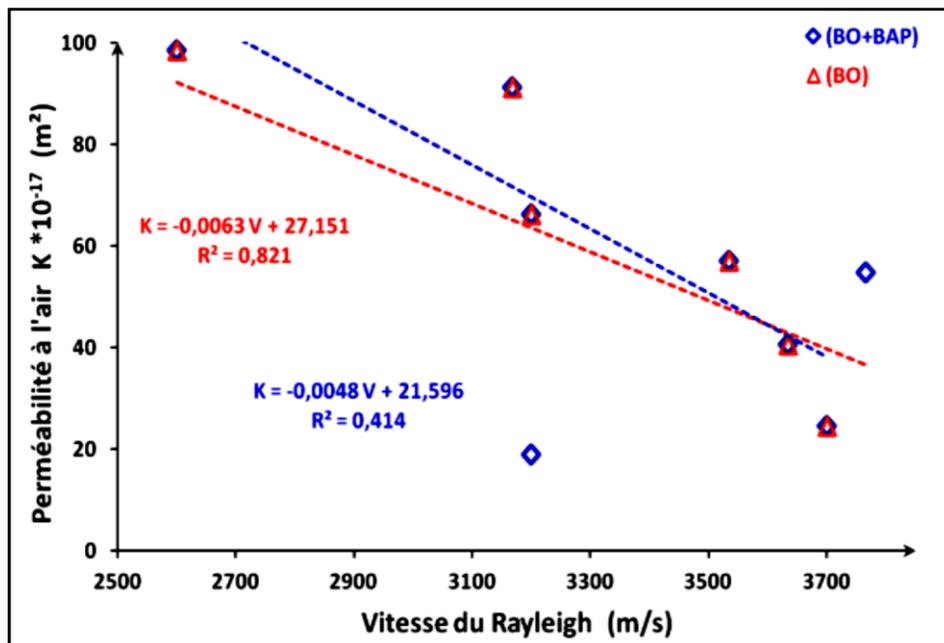


Figure IV.7.a : Evolution de la perméabilité en fonction des vitesses des ultrasons (Béton conservés à l'air libre) [Benouis et Mehamdia 2015].

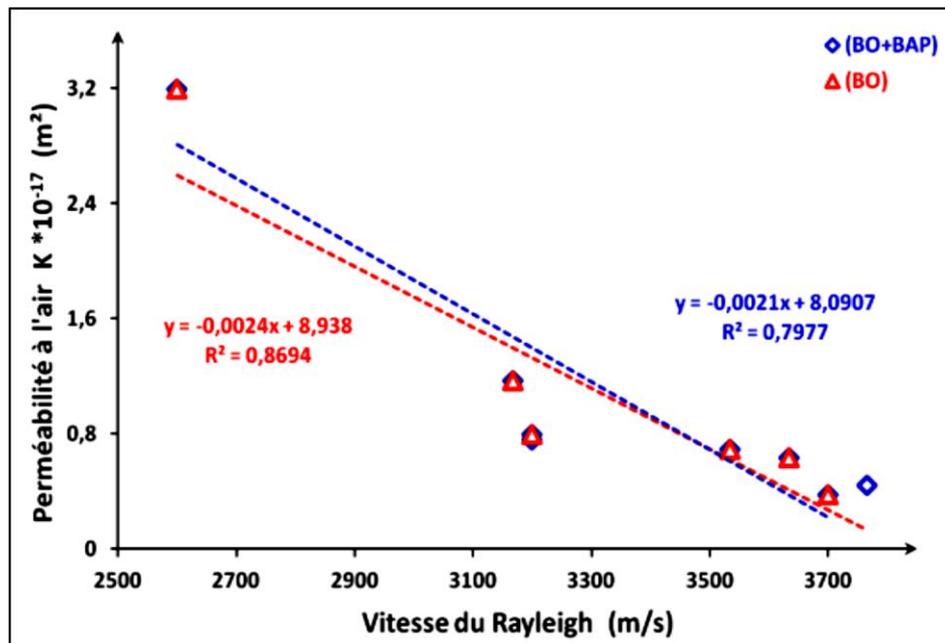


Figure IV.7.b : Evolution de la perméabilité en fonction des vitesses des ultrasons (Béton conservés dans l'eau) [Benouis et Mehamdia 2015].

IV.4 Évaluation non destructive des dommages au béton par ultrasons

La durabilité d'un ouvrage en béton caractérise sa capacité à conserver pendant sa période d'exploitation et dans les conditions imposées par son environnement, les fonctions d'usage pour lesquelles il a été conçu. Durant sa mise en service, le béton subit différentes sollicitations qui peuvent contribuer à lui faire perdre ses propriétés mécaniques initiales. Aussi le béton, un matériau qui a révolutionné le monde de la construction, comporte néanmoins des points faibles. C'est un matériau au comportement fragile qui peut subir des pathologies d'origine chimique ou physique qui lui font également perdre ses propriétés mécaniques d'origine [Kodjo 2008].

Parmi ces pathologies, on peut citer la carbonatation, action des cycles gel-dégel, action des sels de déverglaçage, réaction alcalis-granulats.

En ce qui concerne les essais non destructifs pour l'évaluation de ces pathologies, il existe une panoplie de méthode allant du marteau rebondissant (scléromètre) à la thermographie, le radar ou surtout la propagation des ondes acoustiques (émission acoustique, écho d'impact, ultrasons). La méthode acoustique ; les ultrasons permettent un examen en cœur du matériau [Bui 2012].

Dans les essais par ultrasons, deux problèmes essentiels se posent : d'une part la mise en évidence de l'indicateur ultrasonique et de la corrélation avec l'endommagement matériel et d'autre part l'industrialisation de la procédure avec la mise en place de tests in situ. Les indicateurs à ultrasons utilisés proviennent toujours de mesures de vitesse et / ou d'atténuation. Mais leurs évaluations sont généralement incertaines notamment lorsqu'elles sont menées sur le terrain [Garnier et al. 2000].

IV.4.1 Endommagement par l'alcali-réaction ou réaction alcali-granulat

L'endommagement par réaction alcaline résulte d'une attaque chimique de la silice par des ions provenant des sels alcalins du ciment. Il génère des gels expansifs qui se développent dans les fissures et les pores du béton. Les contraintes internes augmentent et provoquent une fissuration.

Les dommages qui en résultent sont la création de fissures dont les dimensions varient jusqu'à plusieurs millimètres. Les fissures ont une orientation aléatoire s'il n'y a pas de contraintes, ou suivent les directions des contraintes. Le gel peut saigner. La structure se dilate et peut-être déformée globalement [Garnier et al. 2000].

Nous allons ausculter ces dommages par l'ultrason en utilisant la technique de vitesse d'impulsion ultrasonore.

Des études ont mis en avant les capacités potentielles d'un indicateur à ultrasons pour contrôler l'endommagement du béton par réaction alcaline.

Dans l'expérience, les échantillons de béton sont réalisés par paires avec des compositions dites « saines » permettant d'établir des mesures de référence, et des compositions dites « endommagées » dopées à l'alcaline.

Les échantillons sont soumis à des essais de dilatation accélérés dans un réacteur maintenu à 60°C et 100% d'humidité relative. La durée de vieillissement est de 80 jours. Les échantillons sont prélevés hors du réacteur à intervalles réguliers et après refroidissement, sont soumis à des mesures.

Des échantillons de 7x7x28 cm³ sont utilisés pour les mesures de dilatation afin de contrôler la cinétique et l'évolution de la réaction, ainsi que l'état d'endommagement du béton.

Des échantillons de 160 mm de diamètre et 160 mm de long sont soumis à des tests ultrasonores réalisés par transmission au moyen de deux transducteurs 24 kHz et d'un générateur de type Pundit ou par un couple de transducteurs 100 kHz (mesure de vitesse).

Dans un échantillon qui est soumis à une réaction alcaline dommageable, on rencontre trois étapes caractéristiques du procédé, qui sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau IV.3 : Les étapes d'endommagement par la réaction alcali-granat.

	Phénomènes physiques	Vitesse de groupe
étape 1	les pores se remplissent	augmentation
étape 2	craquer	diminution
étape 3	nouveau remplissage	augmentation

Les mesures de dilatation et de vitesse du groupe en fonction du temps (figures IV.8) montrent les évolutions du béton au cours de la réaction.

Les éprouvettes ne subissent pas de retrait par dessiccation grâce à leur maintien à une humidité relative de 100%. Les échantillons dopés se dilatent notablement à partir de 10 jours. Cette croissance atteint un plateau après 40 jours à 0,16%. Il est bien au-delà du seuil de dilatation autorisé.

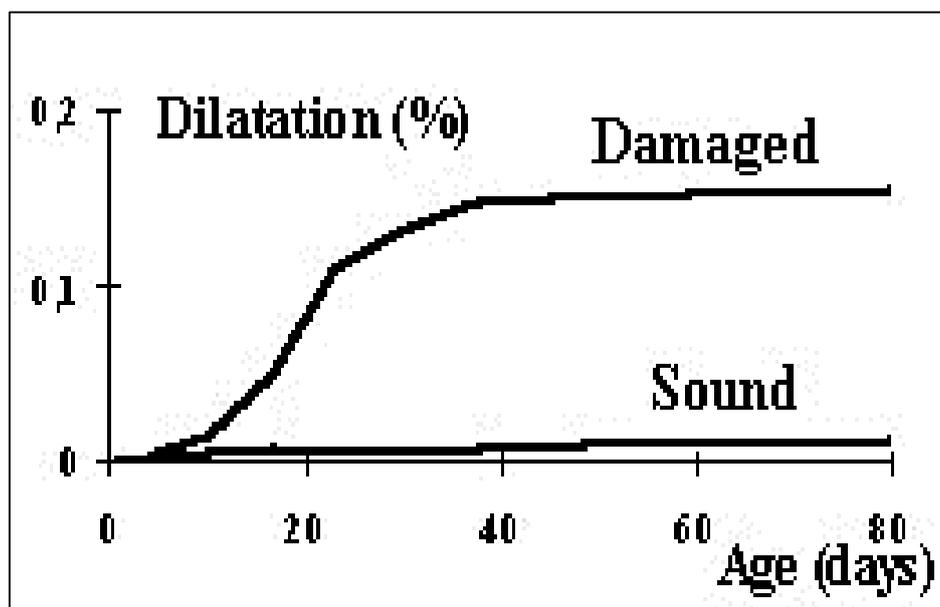


Figure IV.8 : Variation de la dilatation des échantillons dans le temps [Garnier et al. 2000].

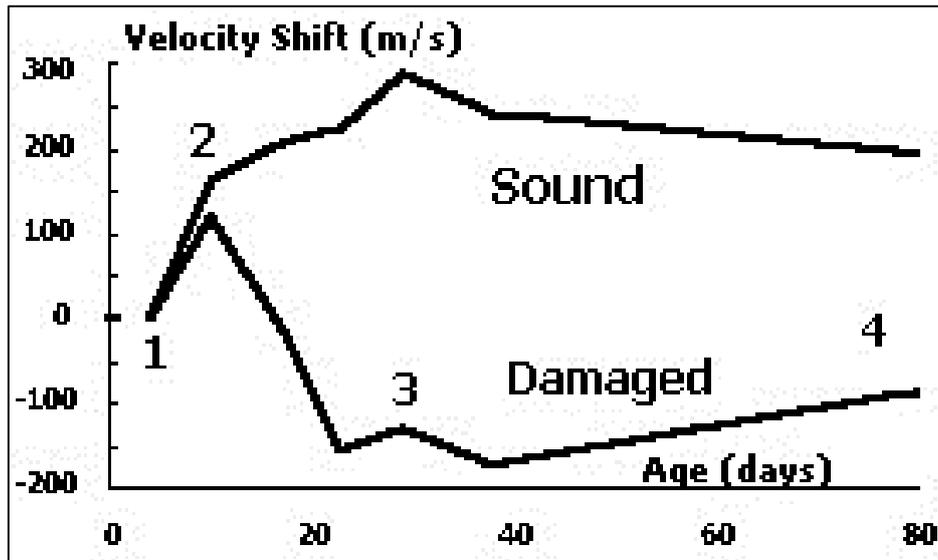


Figure IV.9 : Variation de la vitesse des ondes ultrasonores en fonction de l'âge de l'échantillon [Garnier et al. 2000].

La vitesse du groupe initiale des ondes dans les spécimens est de 4 300 m/s. Il augmente régulièrement pour le matériel sonore. Quant à l'éprouvette qui est endommagée au cours du test, on a 4 points et 3 zones à remarquer dans les évolutions présentées sur la figure IV.9. Les évolutions sont en accord avec les 3 étapes considérées ci-dessus :

- Zone 1 : du point 1 (jour 0) au point 2 (jour 10)

Le béton n'est pas endommagé et les vitesses du son des spécimens endommagés évoluent de manière similaire.

- Zone 2 : du point 2 (jour 10) au point 3 (jour 30)

Le béton est en phase de dilatation. Il se fissure et la différence de vitesse des ondes ultrasonores entre le son et les échantillons endommagés augmente jusqu'à 10%

- Zone 3 Du point 3 (jour 30) au point 4 (jour 80)

Les gels se développent à nouveau, les fissures se remplissent et les différences de vitesse diminuent.

L'évolution de la vitesse du groupe varie en fonction de l'âge du matériau. Il permet de contrôler la réaction alcaline dommageable dans le cas de nos échantillons. Mais devant l'incertitude des mesures de vitesse in situ exprimées ci-dessus, on ne peut pas la retenir comme seule indicatrice possible.

IV.4.2 Endommagement par chocs thermiques et cycles gel-dégel

L'étude de Boukari [Boukari, 2011] a pour objectif la caractérisation de bétons endommagés par chocs thermiques et cycles gel-dégel à l'aide de la méthode ultrasonore.

Au cours de l'expérience, un mélange de béton avec une quantité de ciment de 450kg/m^3 , un rapport E/C de 0,5 et un rapport gravillon/sable de 1. Quatorze cylindres (100x200mm) ont été fabriqués :

- 6 ont été utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques à 28 jours,
- 4 ont été soumis à des cycles de gel/dégel,
- 4 ont été soumis à des chocs thermiques.

Suite à une caractérisation initiale (contrôles non destructifs), les échantillons soumis aux cycles de gel/dégel ont été caractérisés après 35 et 200 cycles (enceinte $-18^\circ\text{C}/+23^\circ\text{C}$ durant 24 h), les échantillons soumis à un endommagement thermique (étuve chauffée à 150°C durant 3h puis trempés durant 10 minutes dans de l'eau à température ambiante) ont été caractérisés après chacun des deux chocs thermiques appliqués.

La figure IV.8 représente les variations moyennes (sur 4 échantillons différents) de la vitesse des ondes ultrasonores « UPV » et du module d'élasticité dynamique « E_{dyn} » entre la caractérisation initiale (état 0) et les différents états de dégradation provoqués. Pour rappel, la notation « T » fait référence à un endommagement par chocs thermiques, « G » fait référence aux cycles de gel/dégel

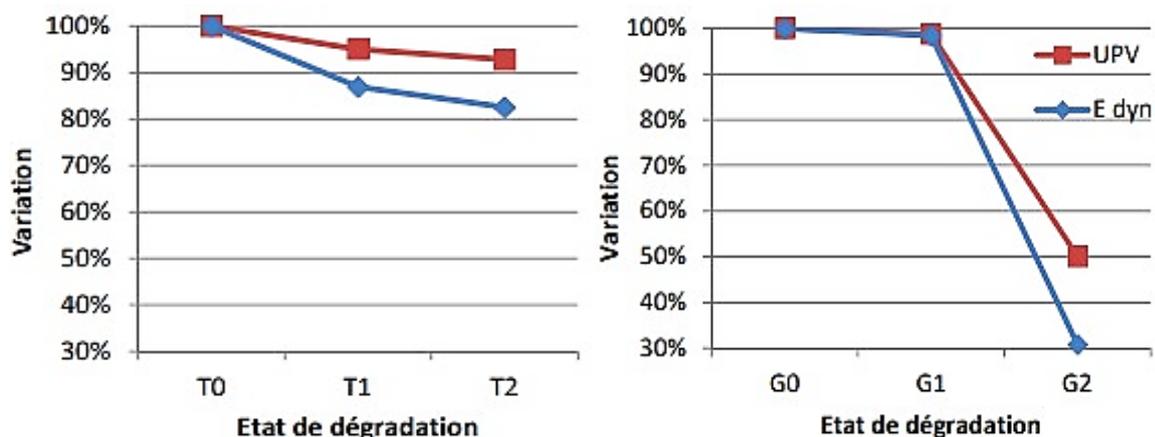


Figure IV.10: Variation des paramètres acoustiques linéaires suite aux chocs thermiques (a) et cycles de gel/dégel (b) [Boukari, 2011].

Les différents chocs thermiques ont provoqué des baisses progressives d'UPV et E_{dyn} . L'ensemble des dégradations a provoqué des diminutions moyennes de 7% pour UPV et de 17% pour E_{dyn} (état T2). Les cycles de gel/dégel ont provoqué une très faible altération des propriétés mesurées (1% de UPV et 2% de E_{dyn}) après 35 cycles (état G1), la dégradation est en revanche très importante après 200 cycles (état G2) avec des baisses respectives de 50% et 70% de UPV et E_{dyn} .

Les différents cas de dégradation pris en compte permettent de considérer, en plus d'une caractérisation initiale (G0 et T0), 4 états d'endommagement relativement distincts. Classés par ordre croissant d'endommagement, il s'agit de : G1, T1, T2, G2. Ces données serviront de référence non destructive à l'étude de la dégradation des bétons. Elles appuient par ailleurs des travaux récents montrant que E_{dyn} est plus sensible à la dégradation du béton que UPV et se présente comme un paramètre non destructif de référence à privilégier [Sargolzahi et al. 2010].

Les photos IV.3 et IV.4 donnent un aperçu de l'apparence des bétons aux états T2 et G2 afin d'illustrer certaines différences entre les deux types de dégradation.

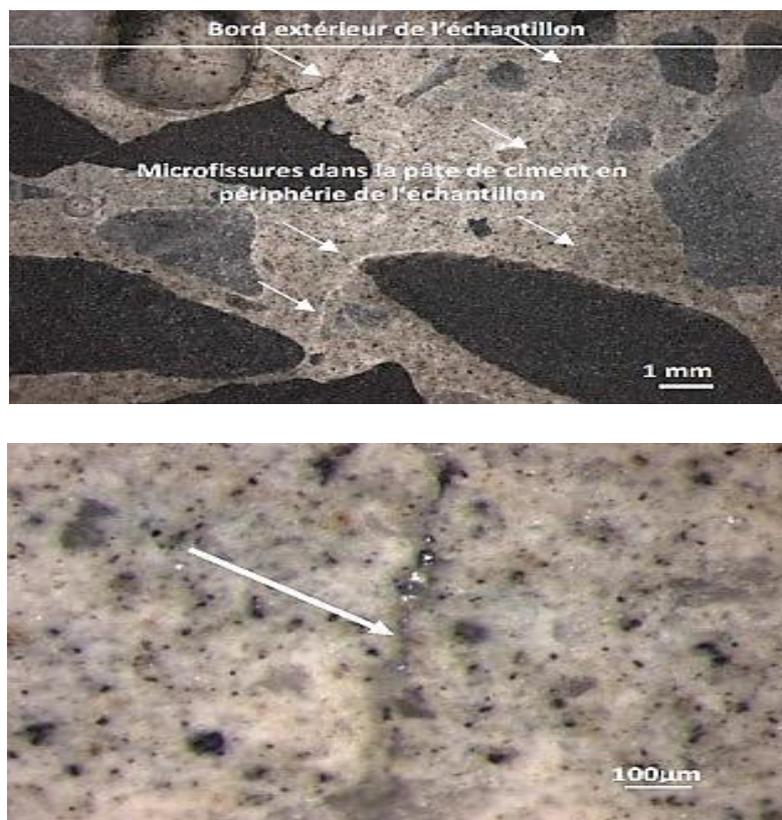


Photo IV.3 : Fissures dans la pâte de ciment après deux chocs thermiques - baisse de 7% d'UPV [Boukari, 2011].



Photo IV.4 : Coupe d'un échantillon après 200 cycles de gel/dégel - baisse de 50% d'UPV [Boukari, 2011].

Dans le premier cas (photo IV.3), des fissures de petite taille (ouverture de l'ordre du micron) sont orientées de manière aléatoire dans la pâte de ciment, principalement en périphérie de l'échantillon où le gradient thermique causé par un refroidissement rapide a été le plus intense. Dans le cas G2 (photo IV.4), l'écaillage sévère du béton (désagrégation de surface) ne permet pas d'effectuer des observations en microscopie optique car les phases de découpe et de polissage amplifient largement la dégradation déjà présente. En effet, un large réseau de fissures est visible en surface de l'échantillon mais c'est l'étape de découpe qui conduit à la désagrégation de surface observée sur la photo IV.4.

IV.5 Conclusion du chapitre

Ce travail a été mené, grâce aux résultats d'anciennes études, pour étudier la relation entre les propriétés du béton et les vitesses d'impulsion ultrasoniques. Ceci dans le but de substituer ces essais non destructifs aux essais destructifs du béton réalisés sur des carottes prélevées sur les ouvrages à ausculter.

L'étude des corrélations entre les propriétés du béton et les vitesses des ultrasons nous a permis de savoir :

- qu'il est possible de développer des bonnes corrélations entre la résistance à la compression par écrasement et les mesures des vitesses ultrasoniques. Ces corrélations sont meilleures en sachant la composition des bétons.
- La corrélation entre la perméabilité et la vitesse des ondes de surface est dans l'ensemble du type linéaire, cette corrélation est meilleure dans les bétons ordinaires,

et devient moins précise en intégrant les bétons autoplaçants avec les bétons ordinaires. L'estimation de la perméabilité à partir des vitesses des ultrasons est plus fiable pour les bétons conservés dans l'eau (essais normalisés) que ceux conservés à l'air libre.

- Il est possible d'estimer avec une précision acceptable la porosité partir de la vitesse ultrasonique pour les bétons ordinaires ou fluides.

Le contrôle non destructif de l'endommagement du béton par ultrason est aussi complexe que le matériau lui-même mais les résultats des études réalisées dans ce contexte laissent présager un avenir prometteur quant à l'utilisation des ultrasons pour caractériser au mieux les propriétés que les dommages du béton.

Références Bibliographiques

- [**Aitcin 2001**] Aitcin, P.-C., Bétons hautes performances, Editions Eyrolles, 2001
- [**Banthia et al. 2005**] Banthia N., BIPARVA A., MINDESS S., Permeability of concrete under stress, Cement and Concrete Research, vol. 35, pp. 1651 – 1655, 2005
- [**Benoui et Grini 2009**] Benouis A., Grini A., Relationship between ultrasonic velocity, mixtures and porosity of concretes (effect of transducers dimensions), NDTCE'09, Non-destructive testing in civil engineering, Nantes, France, June 30th – July 3rd, 2009.
- [**Benouis et Boudjedra 2020**] Benouis A., Boudjedra F., Estimation of the concrete durability by non destructive testing (ultrasonic pulse velocity), Conference Paper, March 2020
- [**Benouis et Mehamdia 2015**] Benouis A., Mehamdia A., Contribution à l'estimation de la perméabilité à l'air des bétons par les vitesses des ultrasons, Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France.
- [**Benouis et Mehamdia 2018**] Mehamdia A., Benouis A., Influence of the size and frequency of contact transducers on the determination of concrete permeability by ultrasonic velocity and attenuation. Journal of Materials and Environmental Sciences. 2018, 9 (3), pp 730-740.
- [**Benouis et Grini, 2011**] Benouis A., Grini A., Estimation of concrete's porosity by ultrasounds, Seventh International Conference on Material Sciences, Physics Procedia, 2011.
- [**Boukari 2011**] Boukari Y., Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par la réaction alcali-silice : apports combinés de méthodes physico-chimiques et acoustiques non linéaires, thèse de doctorat, université de Sherbrooke, mai 2011.
- [**Boukhelkhal et Kenai 2015**] Boukhelkhal D., Kenai S., Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre & Ultrason), Rencontres Universitaires de Génie Civil, Bayonne, France, May 2015.
- [**Bui 2012**] Bui Q., Auscultation non destructive des structures en béton atteintes par la réaction alcali-granulats, mémoire de maîtrise, université de Sherbrooke, Canada, 2012.
- [**Caré et Derkx 2011**] Caré S., Derkx F., Determination of relevant parameters influencing gas permeability of mortars, Construction and Building Materials, vol. 25, pp. 1248 – 1256, 2011.
- [**Chekroun 2008**] Chekroun M., Diffusion multiple des ultrasons pour l'évaluation non destructive du béton avec des ondes de surface, COFREND2008, Toulouse, France, 2008.
- [**Desmettre 2011**] Desmettre C., Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques, thèse de doctorat, université de Montréal, décembre 2011.
- [**Garnier et al. 2000**] Garnier V., Corneloup G., Toppani E., Leygonie M., Non-destructive évaluation of concrete damage by ultrasounds, France 2000.
- [**Garnier et al. 2009**] Garnier V., Chaix J.F., Rossat M., Payan C., Corneloup G., Caractérisation non destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores, 19ème Congrès Français de Mécanique Marseille, France 2009.

[Goueygou. 2003] Goueygou M., Relationship between porosity, permeability and ultrasonic parameters in sound and damage mortar, Proc. of the Int. Symp. on NDT in Civil Engineering, 2003.

[Grini 2008] Grini A., Contribution à la détermination de la porosité des bétons par les ultrasons, mémoire de magister en génie civil, université de Guelma, Algérie, 2008.

[Harid et Sraidi 2016] Harid H., Sraidi S., Contrôle de la qualité du béton par des essais non destructifs « Etude bibliographique », mémoire de master en génie civil, université de Guelma, Algérie, 2016.

[Hernandez et al. 2000] Hernandez M.G., Izquierdo M.A.G., Ibanez A., Anaya J.J., Ullate L.G., Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDE. Ultrasonics, 38, p. 531–533, 2000

[Hernandez et al. 2003] Hernandez M.G., Izquierdo M.A.G., Ibanez A., Anaya J.J., Ullate L.G., Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDT, Ultrasonics 38 (2003), 531-536, 2003

[Jeong et Hsu. 2002] Jeong H., Hsu D. K., Quantitative estimation of material properties of porous ceramics by means of composite micro-mechanics and ultrasonic velocity, NDT & E Int. 29 -2 (2002), 95-101.

[Kodjo 2008] Kodjo A., Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par des méthodes de l'acoustique, non linéaire : Application à la réaction alcalis-silice, thèse de doctorat, université de Sherbrooke, Canada, 2008

[Lafhaj et al. 2006] Lafhaj Z., Goueygou M., Djerbi A., Kaczmarek M., Correlation between porosity, permeability and ultrasonic parameters of mortar with variable water/cement ratio and water content. Cement and Concrete Research, Vol. 36, (2006), pp 625 – 633.

[Mahmoud 2006] Mahmoud I., étude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires), thèse de doctorat de l'INSA l'institut national des sciences appliquées de Toulouse, France, 2006.

[Malhotra et Carino 2003] Malhotra V. M., Carino N.J., Handbook on non destructive testing of concrete, Edition Eyrolles, 2003.

[Neville 2000] Neville A. M., Propriétés des bétons, Edition Eyrolles, 2000.

[Ohdaira et Masuzawa 2000] Ohdaira E., Masuzawa N., Water content and its effect on ultrasound propagation in concrete-the possibility of NDE. Ultrasonics, 2000, 38 (1-8), pp 546–552.

[Ollivier et al. 1995] Ollivier, J. P., Massat, M., & Parrott, L., Parameters influencing transport characteristics. In J. K. a. H. K. Hilsdorf, (éd.), CHAP 4 Performance Criteria for Concrete Durability, 1995

[Panzera et al. 2008] Panzera T.H., Rubio J.C., Bowen C.R., Vasconcelos W.L., Strecker K., Correlation between structure and pulse velocity of cementitious composites. Advances in Cement Research, 2008, 20 (3), pp 101–108.

[Royer 2007] Royer D., Clorennec D., An improved approximation for the Rayleigh wave equation. Ultrasonics, Vol 46, 2007, pp.23-24.

[Sargolzahi et al. 2010] Sargolzahi, M., Kodjo, S.A., Rivard, P. et Rhazi, J., Effectiveness of non destructive testing for the evaluation of alkali-silica reaction in concrete, *Construction and Building Materials*, 2010, 24, 1398-1403.

[Shkolnik et al. 1997] Shkolnik I.E, Udegbumam O.C. and Aktan H.M., Ultrasonic methods of evaluating concrete permeability, *Proc. of the Conference on NDT in Civil Engineering*, British Institute of NDT, University of Liverpool, 1997, pp.111-120.

[Soltani 2008] Soltani, Etude expérimentale de la propagation de l'onde de surface dans un milieu poreux sec et saturé, *COFREND2008*, Toulouse, France, 2008.

[Timbo 2012] Timbo A., Contrôle non destructive des ouvrages en béton par l'ultrason, mémoire de master, université de Guelma, Algérie, 2012.

[Vergaraa et al. 2001] Vergara L., Miralles R., Gosalbez J., Juanes F.J., Ullate L.G., Anaya J.J., Hernandez M.G., Izquierdo M.A.G., NDE ultrasonic methods to characterise the porosity of mortar. *NDT & E International*, 2001, 34 (8), pp 557–562.

[Yaman et al. 2002] Yaman I.O., Aktan H.M., Hearn N., Active and non-active porosity in concrete : Part II. Evaluation of existing models. *RILEM Newspaper of Materials and Structures*. Vol 35 (246), 2002, pp.110-116.

Norme

[NF EN 12504-4] NF EN 12504-4, Essais pour béton dans les structures. Partie 4 : Détermination de la vitesse de propagation du son, AFNOR, 2005.

Références Nétographiques

[Net-1] Diagnostic de l'état du béton

<https://www.iut.u-bordeaux.fr/gc/augc07/index/pdf/MBP/Breysse.pdf>

Consulté le 06/05/2020

[Net-2] Durabilité des bétons par la maîtrise de l'absorption d'eau

https://www.febelcem.be/fileadmin/user_upload/dossiers-ciment-2008/fr/T2-Fr-durabilite-des-betons-absorption-eau.pdf

Consulté le 4/07/2020

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude avait pour objectif de contribuer à la caractérisation du béton par une méthode non destructive, et spécifiquement par mesure des vitesses des ultrasons.

Les différentes dégradations et pathologies qui nuisent à la durabilité des ouvrages en béton armé peuvent être dues à des agents agressifs qui proviennent de l'environnement immédiat de l'ouvrage, de réactions internes dans les matériaux qui les composent ou aux non-respects des propriétés du béton sur chantiers (enrobage insuffisant, mauvais choix des constituants...). Le choix des méthodes d'investigation pour vérifier ces réparations est une opération critique qui mène à un chemin à deux voies l'une des méthodes est destructive et l'autre des méthodes est non destructive, où la méthode d'évaluation par les ondes ultrasonores fait partie de ces techniques.

L'idée d'utiliser cette méthode non destructive est motivée par le fait de sa rapidité donc sa facilité à couvrir l'ensemble de l'ouvrage et pour substituer les essais qui exigent le prélèvement des carottes et s'appuient sur une homogénéité du béton dans l'ensemble de l'ouvrage. Elle se base sur la propagation, l'atténuation et la diffusion des ondes acoustiques ultrasonores. Selon l'échelle de propagation des vitesses ultrasonores on peut prévoir si le matériau est bon ou mauvais en matière de défauts de structure.

Compte tenu des corrélations prometteuses obtenues pour les différents bétons, ainsi que de l'évaluation des pathologies, la vitesse des ondes de surface peut présenter une indication des propriétés physiques du béton. L'hétérogénéité du matériau béton impacte plus l'atténuation provoquant des fluctuations dans l'amplitude résultant en une complexité.

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

Les perspectives pourront concerner l'utilisation de transducteurs sans contact avec le béton car la pression de contact peut influencer l'acquisition des mesures. Il faut aussi s'intéresser à l'effet de la fréquence des ultrasons utilisée sur les différentes mesures et aussi intégrer d'autres propriétés des ultrasons que la vitesse (atténuation par exemple).