

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Mémoire de Magister

Présenté par :

Melle : BENYOUCEF Fazia.

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER** en :

Filière : Génie Civil.

Option : Sol-Structures-Matériaux

TITRE DU MÉMOIRE :
UTILISATION DES ONDES SONORES POUR LA
CARACTÉRISATION DES FISSURES DANS LES
ÉLÉMENTS EN BÉTON.

Devant le jury composé de :

Mr KADRI	Mohammed	Pr	UMBB	Président.
Mr MEHADDENE	Rachid	Pr	UMMTO	Encadreur.
Mr CHAID	Rabeh	Pr	UMBB	Examineur.
DAHMANI	Lahlou	Pr	UMMTO	Examineur
Mr GHOUILEM	Kamel	MC/B	UMMTO	Invité.



REMERCIEMENT

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire de l'Habitat et de Contrôle de Centre, « L.H.C.C » à Rouiba.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mon directeur de mémoire, MEHADDENE Rachid, professeur à l'université de Tizi-Ouzou. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance pour les conseils et le soutien qu'il m'a accordé durant ce travail. Sa patience, sa disponibilité et sa grande compétence m'ont aidé à surmonter les obstacles. Monsieur, j'ai pris beaucoup de plaisir à travailler avec vous.

Ma gratitude s'adresse également à Mr KADRI Mohammed, professeur au département de Génie Civil (F.S.I) ; pour avoir accepté de présider le jury ; Mr CHAID Rabeh, professeur au département de Génie de Matériaux (F.S.I) ; Mr DAHMANI Lahlou Mr GOULEM ; Professeur au département de Génie de Matériaux (U.M.M.T.O) Kamel, Docteur au département de Génie de Matériaux (U.M.M.T.O) pour avoir accepté d'évaluer ce travail. J'ai particulièrement apprécié leurs remarques, leurs lectures précises de ce travail.

Boualem, grâce à toi que j'ai réussi, on ne t'oublie jamais, que ton âme retrouve la paix, là-haut.

Je remercie également tous les chercheurs, les membres du laboratoire « L.H.C.C », département de Matériaux. Merci à KHAFIR Athemane, KHANE Mohamed, AININE Djilali, MEDRAR Nadia. Un grand merci pour tous les membres de ce laboratoire chacun avec son propre nom.

Brahim HADJ KOUIDER, Merci pour vos encouragements, pour votre soutien, pour le temps que vous m'avez accordé ; vraiment merci.

Maman, papa, merci pour tout. J'espère que vous êtes tout simplement fiers de moi, et je vous dédie ce travail. Merci à toute ma famille, à mes amis particulièrement sur qui je peux toujours compter.

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant assistés à ma soutenance.

-RÉSUMÉ-

نظرا لأن جميع المنشآت الخرسانية في النهاية ستعاني من ظاهرة التصدع التي تتجلى في أشكال مختلفة حتى أنها في بعض الأحيان قد تظهر بمجرد تنفيذ الخرسانة عمق الصدع هو واحد من الأسباب الرئيسية للتدهور الذي يمكن أن يؤثر على مظهر البنايات ،على استدامتها ؛ وحتى على أدائها ؛

تقترح هذه الأطروحة طريقة لتحديد عمق الصدع باستخدام تقنيات الاختبارات غير المتلفة، وتحديد طريقة الموجات فوق الصوتية التي تقوم على قياس زمن نشر موجة فوق صوتية بين اثنين من محولات الطاقة (المرسل والمستقبل) موضوعة بشكل متناظر بالنسبة للصدع • تجرى القياسات على ثلاث عينات من الخرسانة المكونة من نفس المواد، بصيغة مختلفة • كل عينة تحتوي على صدعين من عمقين مختلفين ، مع محاولة تحديد أثر عمق الصدع على قوة الصلابة الخرسانة

قصد متابعة حالة عمق الصدع التي تتطلب عملية إصلاح وعلاج، حقن الصدوع هو واحد من الأساليب الأكثر شيوعاً والأكثر فعالية . فعلى الرغم بساطة العملية من الناحية النظرية، إلا أن هذا الأسلوب صعب التطبيق نظرا لعدم توفر المعلومات الكافية حول الوسط الذي تتم فيه العملية ، و نظرا لتوفر العديد من المنتجات و أساليب و معدات الحقن

الكلمات الرئيسية: عمق الصدع ، خرسانة ، باستخدام تقنيات الاختبارات غير المتلفة، الموجات فوق الصوتية، العلاج، وحقن... •

Tous les ouvrages en béton vont éventuellement souffrir de phénomène de fissuration qui se manifeste sous diverses formes ; ces fissures peuvent parfois apparaître dès la mise en place du béton. La profondeur des fissures est l'une des principales causes de dégradation qui peuvent affecter l'apparence des ouvrages, leurs durabilités, et même leurs performances.

Ce travail de mémoire propose une méthode de caractérisation de profondeur de fissures en utilisant les contrôles non destructifs, précisément la méthode des ondes ultrasonores dans les éléments en béton qui se base sur la mesure de temps de propagation d'une onde ultrasonore (onde mécanique) entre deux transducteurs (émetteur et récepteur) placés systématiquement symétrique vis-à-vis de l'ouverture de la fissure. Les mesures sont effectuées sur trois échantillonnages de béton confectionné à base des mêmes matériaux, avec une formulation différente, englobant deux types de fissures de profondeurs différentes, tout en essayant de viser l'impact de la profondeur de fissure sur la résistance à la compression de béton.

Pour donner suite à cette caractérisation de profondeur de fissures qui nécessitera un traitement, l'injection des fissures est l'une des méthodes de réparation du béton les plus efficaces. Quoiqu'elle est simple en théorie, cette technique devient difficile à appliquer étant donné que les informations nécessaires sur le milieu à réparer sont limitées et qu'il existe de nombreux produits, équipements et méthodes d'injection.

Mots clés: profondeur de fissuration, béton, essais non destructifs, ondes ultrasonores, traitement, injection...

Knowing that all the concrete structures will eventually suffer from cracking phenomenon that occurs in various forms; it can sometimes appear from the implementation of concrete. Depth Cracking is one of the main causes of deterioration which can affect the appearance of the works, their sustainability, and even performance.

This memory proposes a method for characterization of deep cracks using non-destructive testing method, precisely ultrasonic waves in the concrete elements, which is based on measuring the propagation time of an ultrasonic wave (wave mechanics) between two transducers (transmitter and receiver) placed systematically symmetrical relative to the crack. The measurements are performed on three samplings of concrete made the same materials with a different formulation; including two cracks of different depths, while trying to aim the impact of the depth of crack on the compressive strength of concrete.

To follow up this characterization of deep cracks that will require treatment, crack injection is one of the methods of repair of the concrete the most prized. Although is simple in theory; because the necessary information about the middle to repair are limited and there are many products, equipment and injection methods.

Keywords: depth of cracking, concrete, nondestructive testing, ultrasonic wave treatment, injection ...

Remerciement.....	01
Résumé.....	02
Table des matières	05
Liste des tableaux.....	09
Liste des figures.....	10
Introduction.....	12

CHAPITRE-I- LE BÉTON.

I-1- Le matériaux béton et les constituants	14
I-1-1-Les granulats	15
I-1-2-Sable	15
I-1-3-Le ciment	15
I-1-4-L 'eau.....	15
I-2-Formulation.....	16
I-3-Qualité du béton: Influence des différents paramètres.....	16
I-3-1-la porosité	16
I-3-2-Rapport eau / ciment.....	17
I-3-3-Rapport granulats/ciment	17
I-3-4-Les adjuvants.....	18
I-4-Comportement en traction uniaxiale.....	18
I-5-Comportement en compression uniaxiale.....	19

CHAPITRE-II-LA FISSURATION DANS LE BÉTON

Partie-A- Les fissures.

II-1-Les fissures.....	20
II-2-Origines de la fissuration	20
II-2-1-Origines mécaniques.....	20
II-2-2-Origines physico-chimiques.....	21
II-2-3-Origines chimiques.....	23
II-2-4-Origines thermiques.....	23
II-3-Formes des fissures.....	24
II-4-Méthodes d'investigation des fissures.....	23
II-4-1-Inspection visuelle	23
II-4-2-Inspection destructive	23
II-4-3-Inspection non destructive.....	27

Partie-B- Caractérisation de la profondeur des fissures en employant la méthode des ondes ultrasonores.

II-1-Les méthodes existantes pour la caractérisation de profondeur des fissures.....	28
II-1-1-Méthodes analytiques.....	28
II-1-2-Exposé des méthodes graphiques.....	29

Partie-C-Réparation des fissures.

II-1-Réparation des fissures.....	32
II-1-1-Calfatage.....	32
II-1-2-Épinglage.....	33
II-1-3- Les renforts des structures.....	33
II-2-L' Injection.....	34
II-2-1-Types d'injection.....	34
II-2-2-Temps d'injections.....	37
II-2-3-Produits propices.....	37

CHAPITRE-III-LES MÉTHODES NON DESTRUCTIVES DANS LE BÉTON

Partie -A- Les méthodes non destructives.

III-1-Généralités sur les méthodes non destructives.....	39
III-2-Développement des techniques de contrôle non destructif.....	39
III-3-Combinaison des essais non destructifs avec d'autres méthodes.....	40
III-4-Secteurs d'application des méthodes non destructives.....	40
III-5-Application des essais non destructifs pour le béton.....	41
III-5-1-Objectifs des essais non destructifs.....	41
III-5-2-L' apport des techniques non destructives pour la caractérisation de béton.....	41
III-6-La méthode ultrasonore dans le béton (diffusion multiple).....	41
III-7-Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans le béton.....	43
III-8-Effet du rapport E/C sur les mesures ultrasonores.....	44
III-9-Vitesse des ondes ultrasonores dans le béton.....	45
III-10-Corrélation entre la vitesse de propagation des ondes et les modules d'élasticité.....	46

Partie-B-Les ondes ultrasonores.

III-1-Contexte	47
historique.....	47
III-2-Ondes ultrasonores.....	48
III-3-Caractéristiques des ondes ultrasonores.....	49
III-4-Appareil d'auscultation dynamique « Ultrason ».....	49
III-4-1-Fonctionnement de l'appareil.....	49
III-4-2-Positionnement des transducteurs.....	51
III-4-3-Principe d'utilisation des ultrasons.....	51
III-5-Modes de propagation des ondes ultrasonores.....	52
III-6-Paramètres de l'onde ultrasonore.....	52
III-6-1-Période (T) et fréquence (f).....	53
III-6-2-Pulsation (ω).....	53
III-6-3-Nombre d'onde (k).....	53

III-6-4-La vitesse de propagation.....	
III-6-5-Longueur d'onde (λ).....	53
III-6-6-Espace-temps.....	54
III-7-Notions élémentaires utilisées dans l'acoustique.....	54
III-7-1-Impédance acoustique.....	54
III-7-2-Intensité acoustique.....	54
III-7-3-Puissance acoustique.....	55
III-8-Interaction des ondes ultrasonores avec la matière.....	55
III-8-1-Interface.....	55
III-8-2-Émission et réception de l'onde ultrasonore.....	55
III-8-3-La transmission.....	55
III-8-4-La réflexion.....	56
III-8-5-La réfraction.....	56
III-8-6-La diffusion.....	57
III-9-Description d'un faisceau ultrasonore émis.....	57
III-9-1-La zone de FRESNEL (champ proche).....	57
III-9-2-La zone de FRAUNHOFER (champ éloigné).....	58
III-10-Atténuation d'une onde ultrasonore.....	59

CHAPITRE-IV-PARTIE EXPÉRIMENTALE

Programme expérimental -I- : Utilisation des ondes ultrasonores pour la caractérisation de profondeur des fissures dans les éléments en béton.

IV-1-Elaboration de béton objet de cette étude.....	61
IV-2-Présentation des matériaux.....	61
IV-2-1-Sable.....	61
IV-2-2-Les graviers.....	62
IV-2-3-Ciment.....	62
IV-2-4-Adjuvant.....	62
IV-2-5-L'eau de gâchage.....	63
IV-3-Formulation des bétons.....	63
IV-3-1-Formulation de béton courant B ₂₅	63
IV-3-2-Formulation de béton courant B ₁₅	64
IV-3-3-Mortier.....	65
IV-4-Les équipements requis au fil des essais.....	65
IV-5-Procédure de confection des éprouvettes.....	66
IV-5-1-Test de Vicat.....	66
IV-5-2-Confection et protocole de fissuration des éprouvettes.....	67
IV-6-Evaluation de la résistance de béton (fissuré et témoin).....	69
IV-6-1-Mode opératoire d'un prélèvement de béton par carottage.....	69
IV-6-2-Essais de compression.....	71

Programme expérimental –II- La réparation des fissures.

IV-1-Matériels utilisés pour la réparation.....	72
IV-2-Produits utilisés lors de la réparation des fissures.....	72
IV-2-1- MEDAJOINT MASTIC.....	72
IV-2-2-MEDAPOXY INJECT 812.....	73
IV-3-Les préliminaires de la réparation des fissures (préparation des supports).....	73
IV-4-Réparation des fissures.....	74
IV-4-1-Mise en œuvre de la résine.....	74
IV-4-2-Procédure de mise en œuvre des injections.....	75

CHAPITRE-V- RÉSULTATS & DISCUSSIONS

V-1- Caractérisation ultrasonores de profondeur des fissures dans les éléments en béton.....	77
V-1-1-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures de béton B ₂₅	78
V-1-2-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures de béton B ₁₅	79
V-1-3-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures de mortier M.....	80
V-1-4- Représentation graphique de la caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures	81
V-1-5- Analyse de la caractérisation de profondeur de fissures par type de béton.....	82
V-2-La variation de vitesse ultrasonore	85
V-3-Influence de la profondeur de la fissure sur la résistance de béton.....	87
V-4-Effet de l'injection sur les fissures.....	89
V-4-1-béton B _{R25}	90
V-4-2-béton B _{R15}	90
V-1-3-Mortier M _R	91
V-5-Evaluation de vitesse de béton réparé.....	92
V-6- Évaluation de la résistance du béton traité.....	93
Conclusion Generale.....	95
Bibliographie.....	98

Tableau II-1- Fissure dans un ouvrage en béton.

Tableau IV-1- Caractéristiques physico-chimiques du sable.

Tableau-IV-2- Caractéristiques physiques des agrégats.

Tableau-IV-3-Essais mécaniques sur le ciment.

Tableau-IV-4-Caractéristiques de l'adjuvant.

Tableau-IV-5- Proportions optimales de mélange de béton B₂₅.

Tableau-IV-6- Proportions optimales de mélange de béton B₁₅.

Tableau-IV-7- Proportions optimales d'un mortier –M-.

Tableau-IV-8- Temps de prise de ciment.

Tableau-V-1-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures « B₂₅ ».

Tableau-V-2-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures « B₁₅ ».

Tableau-V-3-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures « M ».

Tableau-V-4-Résistance en compression.

Tableau-V-5-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissures de béton « B_{R25} »

Tableau-V-6-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissures de béton « B_{R15} ».

Tableau-V-6-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissures de mortier « M_R ».

Tableau-V-8-resistance mécanique à la compression de bétons après réparation.

Figure-I-1-Vue en coupe dans un bloc de béton.

Figure I-2-Processus de l'hydratation.

Figure-I-3-Comportement de béton en traction uniaxiale.

Figure-I-4-Courbe contrainte-déformation de béton soumis à une compression uniaxiale.

Figure-II-1-Phénomène de ressuage.

Figure-II-2-Fissures dues au retrait plastique.

Figure-II-3-Fissures dues à la corrosion des armatures.

Figure-II-4-Les fissures dans un ouvrage en béton.

Figure-II-5-Inspection visuelle d'une fissure.

Figure-II-6-Évaluation de la profondeur de fissure conformément au B.S

Figure-II-7- Mode opératoire de la méthode -A-

Figure-II-8- Mode opératoire de la méthode -B-

Figure-II-9- La réparation des fissures par la technique de calfatage.

Figure-II-10-La réparation des fissures par la technique de l'épinglage.

Figure -II-11-Trou de forage interceptant des fissures.

Figure -II-12-Injection d'une fissure horizontale.

Figure -II-13- Injection des fissures verticales, et des fissures inclinées.

Figure -II-14-Injection des fissures fines.

Figure -II-15-Effets de la température sur l'injection.

Figure III-1- Diffraction d'une onde ultrasonore par une hétérogénéité.

Figure III-2- Diffusion multiple (Diffraction) des ondes ultrasonores par les hétérogénéités.

Figure-III-3- Échelle des ondes élastiques.

Figure-III-4- Appareil d'auscultation « Ultrason ».

Figure-III-5-Transducteur ultrasonore.

Figure-III-6-Modes d'acquisition.

Figure III-7-Mode de propagation des ondes ultrasonores.

Figure-III-8-Période d'une onde sonore.

Figure-III-9- Réflexion des ondes ultrasonores.

Figure-III-10- Réfraction des ondes ultrasonores.

Figure -III-11- Diffusion des ondes ultrasonores.

Figure-III-12-Champ rapproché, champ éloigné de l'onde ultrasonique.

Figure -III-13-Représentation du champ de Fraunhofer.

Figure-IV-1-Courbe granulométrique du béton B₂₅.

Figure-IV-2- Courbe granulométrique du béton B₁₅.

Figure-IV-3- Essai de prise de ciment.

Figure-IV-4- Confection des éprouvettes et création des fissures artificielles dans les bétons (B₂₅, B₁₅, M).

Figure-IV-5-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures dans les éléments en béton.

Figure-IV-6-Réalisation de carottage des différentes éprouvettes (Fissurées et témoins).

Figure-IV-7- Surfaçage des carottes normalisées.

Figure-IV-8- Écrasement des carottes.

Figure-IV-9-Préparation des supports pour l'injection.

Figure-IV-10-Procédure de mise en œuvre de l'injection.

Figure-IV-11-Auscultation ultrasonores des éprouvettes réparées.

Figure-IV-12-Prélèvement, surfaçage et écrasement des carottes réparées.

Figure-V-1-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure. (béton B₂₅, h₁=10cm).

Figure-V-2 Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure. (béton B₂₅, h₂=5cm).

Figure-V-3-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure. (béton B₁₅, h₁=10cm).

Figure-V-4-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure (béton B₁₅, h₂=5cm).

Figure-V-5-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure (mortier M, h₁=10cm).

Figure-V-6-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure (mortier M, h₂=5cm).

Figure-V-7-Analyse de profondeurs des fissures des bétons (B₂₅, B₁₅, M), h₁=10cm .

Figure-V-8-Analyse de profondeurs des fissures des bétons (B₂₅, B₁₅, M), h₂=5cm .

Figure-V-9-Carottes fissurées (h₁=10cm et h₂=5cm) prélevées des différents bétons, A- (B₂₅), B-(B₁₅), C-(M).

Figure-V-10-Carottes des bétons témoins prélevés des différents bétons A- (B₂₅), B-(B₁₅), C-(M).

Figure-V-11-Variation de vitesse ultrasonore de béton B₂₅(témoin et fissuré).

Figure-V-12-Variation de vitesse ultrasonore de béton B₁₅ (témoin et fissuré).

Figure-V-13-Variation de vitesse ultrasonore de mortier M (témoin et fissuré).

Figure-V-14-Relation entre la profondeur de fissure et la résistance de béton.

Figure-V-15-Carottes réparées à l'aide de l'injections A- (B_{R25}), B-(B_{R15}), C-(M_R).

Figure-V-16-Variation de vitesse ultrasonore de béton réparé -B_{R25}-.

Figure-V-17-Variation de vitesse ultrasonore de béton réparé -B_{R15}-.

Figure-V-18-Variation de vitesse ultrasonore de mortier réparé -M_R-.

Figure-V-19-Évaluation de la résistance à la compression des bétons réparés.

-INTRODUCTION-

L'étude des pathologies des ouvrages en béton met en évidence l'existence de désordres induits par la dégradation, l'endommagement des matériaux, ainsi une altération mécanique, physico-chimique des bétons, et des armatures métalliques.

Ces mécanismes de dégradation se traduisent par des fissurations excessives de béton, dont on ne peut pas identifier leurs aspects (des fissures profondes ou de surfaces).

Non seulement que ces fissures défigurent l'aspect esthétique de l'ouvrage, mais comme conséquence plus préoccupante, la profondeur de ces fissures est une particularité déterminante de l'état de santé de l'ouvrage, elle est à l'origine d'une perte de caractéristiques des armatures (corrosion des armatures), et donc par une diminution des propriétés mécaniques qui présente un grand risque sur tout l'ouvrage.

Afin de remédier à ce problème de caractérisation qui n'était pas exécutable qu'en employant les essais destructifs « carottage », ce dernier fournit des résultats indicatifs seulement sur la profondeur des fissures. D'autant plus il se caractérise par la difficulté de le réaliser sur les différentes parties de l'ouvrage, et dans certains cas, l'importance de l'ouvrage lui-même ne permet pas d'effectuer un carottage. À ce stade-là, interviennent les méthodes d'évaluation non destructives de béton, typiquement « la méthode des ondes ultrasonores », dans le but est d'apporter un diagnostic précieux à l'égard de la caractérisation de profondeur des fissures dans les éléments en béton.

La méthode des ondes ultrasonores est utilisée pour simplement détecter une altération des caractéristiques des matériaux, localiser une zone endommagée, déterminer l'étendue de l'endommagement, ou même quantifier précisément l'évolution de cet endommagement au cours du temps.

Parce qu'il faut soigner le béton fissuré, limiter son influence sur le reste de l'ouvrage, et pallier les pertes de résistance mécanique des différents éléments, il est devenu nécessaire d'effectuer des réparations sur les parties altérées et endommagées. L'injection est l'une des méthodes de réparation du béton les plus commodés. Quoique simple en théorie, cette technique est difficile à appliquer, étant donné que les informations nécessaires sur le milieu à réparer sont limitées et qu'il existe de nombreux produits, équipements et méthodes d'injection.

C'est pour tenter de répondre à toutes ces interrogations, que nous avons choisi d'axer notre travail de recherche, sur l'utilisation des ondes ultrasonores pour la caractérisation de profondeur des fissures dans les éléments en béton. Nous avons donc élaboré un programme de travail, qui dans un premier temps délimite le champ bibliographique par une définition du sujet traité, puis dans une seconde étape, on présente la démarche expérimentale, qui conduira à des résultats dont les caractéristiques seront analysées.

Une étude bibliographique que nous détaillons dans trois chapitres : un premier chapitre nous a permis de faire le point sur l'utilisation des méthodes non destructives en général, puis on se limite par l'étude des ondes ultrasonores dans le béton ; dans un deuxième chapitre , on

développe le matériau objet de cette étude , « le béton », et on termine l'étude bibliographique par un troisième chapitre qui traite l'élément majeur de cette étude, c'est-à-dire « les fissures » en exposant leurs origines, leurs formes... etc. Les méthodes existantes pour caractériser la profondeur de fissure, et le traitement des fissures.

Par la suite, un quatrième chapitre comprend plusieurs études expérimentales précédées d'une présentation des caractéristiques physico-chimiques des matériaux utilisés lors de cette étude. Enfin, un dernier chapitre qui comporte une analyse des résultats obtenus, et on termine par une conclusion générale.

CHAPITRE-I-

LE BÉTON

L'histoire de béton remonte à deux mille ans avant J-C. À cette époque, les Romains construisaient leurs premiers ouvrages à base d'une chaux vive très résistante et durable connue par « la pierre ». Plus tard (19^e siècle), les véritables recherches approfondies sur les propriétés de la chaux furent entreprises par Smeaton, Vicat et Aspdin qui montrèrent dans un premier temps que le clinker issu de la calcination du mélange « Calcaire — argile » fournissait une meilleure hydraulicité au liant.

En 1855, du gypse (SO_3) en une petite quantité ajouté au clinker permet d'obtenir au contact de l'eau une étringite (mélange formant une étreinte à partir des constituants par réaction chimique) homogène et maniable pendant un laps de temps. Ce mélange original « gypse — clinker » fut breveté et possède encore aujourd'hui l'appellation « Ciment Portland Artificiel » (réglementairement CPA - CEM I). Puis, rapidement, les premiers mortiers et bétons furent mis en œuvre en introduisant dans la pâte de ciment respectivement du sable ou des granulats.

I-1-Le matériau béton et les constituants

Le béton désigne un matériau composé de granulats et de sable, liés entre eux par une pâte (liants, comme certaines additions minérales et adjuvants peuvent être ajoutés en faible quantité afin de donner des propriétés spéciales (des fumées de silice ou des super-plastifiants). Lorsque le béton ne contient pas de granulats, mais uniquement du sable, du ciment et de l'eau, on parle alors de mortier. Une vue en coupe d'un bloc de béton est présentée en (Figure-I-1).

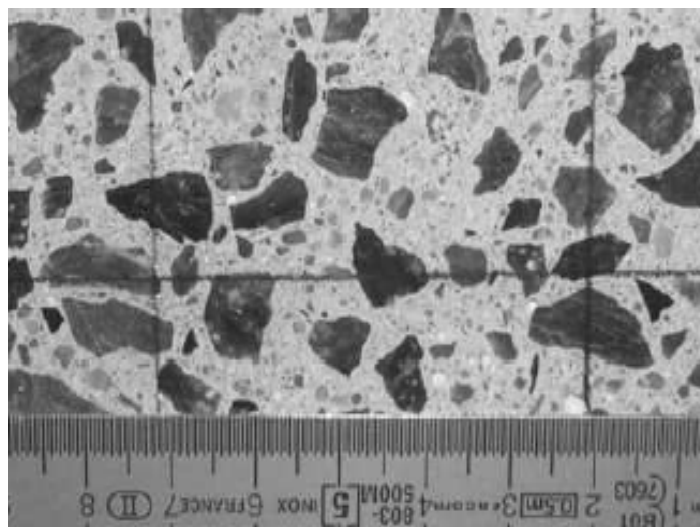


Figure-I-1-Vue en coupe dans un bloc de béton.

L'intérêt principal de bétons réside dans le changement d'état qu'ils subissent durant leur prise : facilement, ils peuvent être mis en place par simple coulage, étant liquides lors de leurs fabrications, et par la suite, ils deviennent très résistants au fur et à mesure de l'avancée de la prise.

I-1-1-Les granulats

Les granulats sont les plus gros constituants de béton, et peuvent provenir de différentes roches inertes **[01]** (silico-calcaires, basaltes, granites. . .), ils représentent environ 50 % de la masse de béton complet. Ils peuvent être « roulés » d'une forme arrondie (granulats issus du lit de rivière), ou « concassés » (issus de carrière) et peuvent présenter des formes angulaires. La dimension des granulats est déterminée par criblage sur des tamis à mailles carrées.

Les bétons sont caractérisés par le paramètre $D_{\max}$, qui représente le diamètre maximal des granulats qui corresponde au granulat de la plus grande dimension. Une bonne part de la résistance des bétons est tirée des granulats, et particulièrement des plus gros d'entre eux.

I-1-2-Sable

Le sable représente les constituants rocheux dont les dimensions peuvent varier de **(100µm)** à environ **(5 mm)**, sa granulométrie est définie de la même manière que pour les plus gros granulats. La dimension des grains de ciment étant de l'ordre de quelques micromètres, le béton présente alors une continuité de dimensions allant du micromètre au centimètre, cette continuité assure une bonne compacité du matériau en minimisant les espaces entre les constituants avec un remplissage du sable, ce qui améliore les propriétés mécaniques de l'ensemble.

I-1-3-Le ciment

C'est le constituant fondamental de béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion, en un corps solide qui se présente sous forme d'une poudre minérale fine s'hydratant en présence d'eau, pour créer la pâte enrobant les granulats. Faisant la prise, le ciment, forme une pâte qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau.

I-1-4-L 'eau

Elle représente l'élément déclenchant d'activation du ciment pour les réactions chimiques, elle ne doit alors intervenir qu'en tant qu'agent hydratant et ne doit donc pas contenir d'éléments dissous susceptibles de réagir avec le ciment ou avec les armatures utilisées en béton armé.

Aussi l'eau est caractérisée par son aptitude à se glisser entre les granulats, et à les éloigner les uns des autres, permettant ainsi au béton de s'écouler, elle est toujours introduite en quantité largement supérieure à celle requise par l'hydratation du ciment, de manière à conférer au béton une bonne ouvrabilité.

Pour améliorer l'aspect mécanique du béton, ou pour atteindre les modifications recherchées dans une composition de béton, on a recours à additionner au mélange initial de béton des éléments supplémentaires tels que :

- ✓ Les charges fines complémentaires ;
- ✓ Les adjuvants.

I-2-Formulation

Les bétons sont conçus en suivant une formulation, fournie sous forme de dosages « volumétriques » ou de préférence « pondéraux », afin d'obtenir les quantités des matériaux dans un volume d'un mètre cube (1 m^3) de béton. Le passage de l'un à l'autre pouvant toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

En général, il n'existe pas de méthode de composition de béton qui est universellement reconnue comme étant la meilleure, toutes les méthodes de composition visent à optimiser l'empilement des différentes particules (grains de ciment, sable, graviers) afin de minimiser les espaces vides [01], [02] ; mais, on dira qu'une méthode peut être considérée comme satisfaisante, si elle permet de réaliser un béton répondant aux propriétés mécaniques ou des exigences recherchées (la résistance caractéristique exigée, agressivité du milieu ambiant, la dimension D des granulats....).

Le mélange de différents constituants le béton lors de sa fabrication s'appelle une « **Gâchée** ». L'eau du mélange hydrate progressivement le ciment pour former par la suite un matériau poreux, qui solidarise le sable et les granulats entre eux.

On appelle « **cure** » le moyen utilisé pour protéger le béton des échanges avec l'extérieur (en particulier le séchage), afin d'assurer la prise, elle est particulièrement importante pendant le jeune âge de béton. Et à la fin le durcissement de manière optimale.

On considère traditionnellement que les propriétés mécaniques finales de béton sont atteintes au bout de 28 jours ; mais, réellement ses propriétés évoluent continûment, et ne peuvent être considérées comme stabilisées qu'au bout de 90 jours ou plus.

I-3-Qualité du béton : Influence des différents paramètres

La qualité d'un béton sain dépend de la qualité des constituants, de la formulation, et les conditions de cure, et comme il y a une grande variété de béton, donc, les propriétés de ces bétons sont très variables. Pour les ouvrages, on caractérise les bétons par la résistance à la compression, généralement déterminée après 28 jours de cure. La résistance à la traction peut également être déterminée, elle traduit alors la résistance à la fissuration du béton. Cette résistance à la traction correspond à environ 10% de la résistance à la compression du béton.

I-3-1-la porosité

Une propriété mécanique importante de béton est la porosité, elle est définie comme le volume total des vides contenus dans un mètre cube (1 m^3) de béton. Elle se manifeste sous forme de pores ou des vides plus ou moins interconnectés, ainsi, que de micro ou macro-fissurations. On recherche particulièrement une faible porosité lors de la formulation du béton, qui assure une meilleure résistance mécanique de béton.

La porosité de béton dépend de rapport (E/C) : Un rapport (E/C) élevé induisant une forte porosité, mais également des conditions de cure : l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible de ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue le diamètre moyen des pores [03], [04].

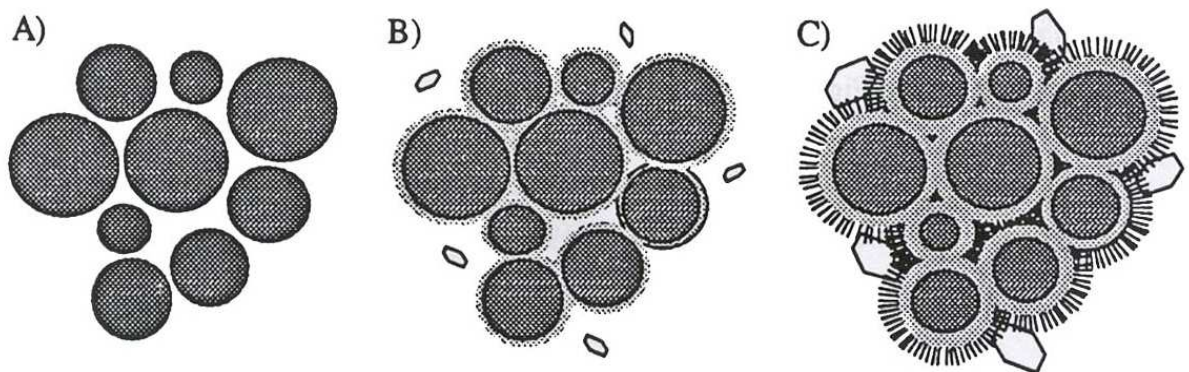
I-3-2-Rapport eau / ciment

Le rapport de la quantité massique d'eau sur celle de ciment (appelé rapport E/C) entraîne une grande influence sur la porosité de la pâte de ciment hydraté. Il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de ciment en suspension dans l'eau de gâchage. Un rapport (E/C) faible donnera un béton plus compact avec de meilleures propriétés mécaniques, mais, une ouvrabilité plus faible, à l'inverse un béton ayant un rapport(E/C) élevé sera plus aisé à mettre en œuvre, cependant, l'espacement entre les grains de ciment sera plus grand.

Pratiquement, la quantité d'eau nécessaire dans un mélange normal est toujours très supérieure à celle qui est nécessaire pour l'hydratation de ciment pour qu'il atteigne sa forme finale dans le béton.

Une grande partie de l'eau supplémentaire nécessaire dans les mélanges pour les rendre malléables sera évaporée lorsque le béton atteindra sa forme finale, (Figure-I-2).

Le rapport eau/ciment constitue une sorte d'indice de résistance dans les mélanges de béton, en général il est compris entre (0,3) et (0,9) pour les cas les plus extrêmes, et celui-ci nécessaire à l'hydratation complète du ciment est (0,38) ; [03].



A) -Etat initial B) -Recouvrement des grains de ciment C) -Création des liens entre particules.

Figure I-2-Processus de l'hydratation.

I-3-3-Rapport granulat/ciment

Comparé au rapport « E/C », le rapport « G/C » est en particulier le rapport sable/ciment est un facteur de deuxième importance, quant à la résistance de béton. Les matières inertes formant les granulats sont liées entre elles par le ciment. Pour un rapport (E/C) constant, il a été démontré qu'un béton faiblement dosé (rapport G/C faible) était plus résistant [05].

Les raisons exactes d'un tel comportement ne sont toujours pas connues, mais l'explication la plus probable provient du fait que la teneur totale en eau par mètre cube de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment que dans un béton fortement dosé, il en résulte que le pourcentage de vides par rapport au volume total de béton est plus faible dans un béton faiblement dosé en ciment, et que ce sont justement ces vides qui ont un effet négatif sur la résistance.

I-3-4-Les adjuvants

Contrairement au ciment, aux granulats et à l'eau, les adjuvants ne sont pas essentiels au béton. Cependant ce sont des constituants de plus en plus utilisés au point qu'actuellement dans la majorité des applications, un béton sans adjuvant est une exception.

Différents types d'adjuvants peuvent être utilisés selon les besoins : des accélérateurs, des retardateurs, des réducteurs d'eau..., etc. Il y a toutefois lieu d'insister sur le fait que même utilisés de manière adéquate et bénéfique pour le béton tant sur le plan technique qu'économique, ils ne peuvent en aucun cas servir à corriger la mauvaise qualité des autres constituants, ni leur dosage incorrect.

I-4-Comportement en traction uniaxiale

Étant conçues pour supporter des efforts de compression, les structures en béton sont rarement testées en traction, la résistance en traction d'une pâte de ciment est très inférieure à la résistance théorique, la différence est due à la présence de défauts. Ces derniers agissent comme des zones de concentration de contraintes, provoquant des fissures microscopiques, alors que la contrainte moyenne dans toute l'éprouvette demeure faible.

La figure (I-4) représente la réponse du béton à la traction uniaxiale. Lorsque la charge augmente, les microfissures demeurent stables jusqu'à environ (30%) ou plus de la charge maximale, puis elles commencent à s'allonger, à s'élargir, et à se multiplier. Pour des valeurs de charge situées entre (70 % et 90%) de la résistance maximale, les fissures s'ouvrent à travers le mortier (pâte de ciment et granulats fins) et s'interconnectent de manière à former un réseau continu de fissuration. Ce stade de propagation rapide de la fissure se poursuit jusqu'à conduire le matériau à la rupture finale.

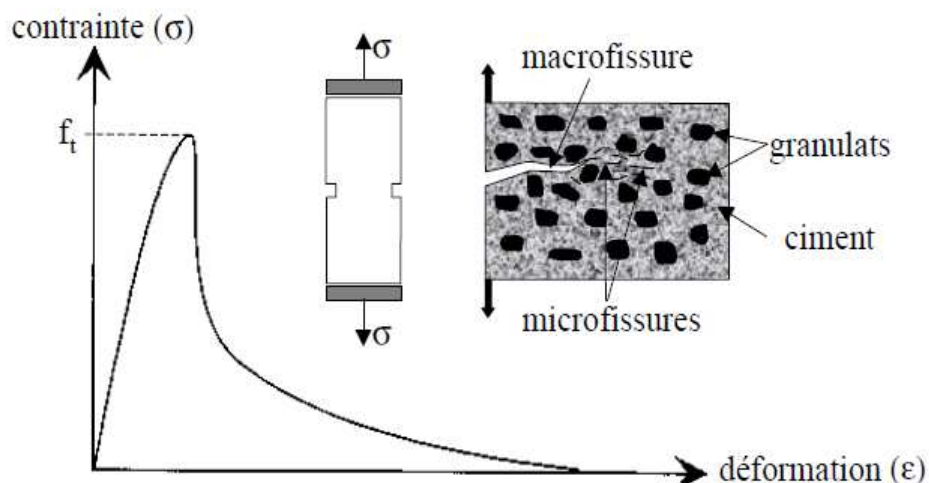


Figure-I-3-Comportement de béton en traction uniaxiale.

I-5-Comportement en compression uniaxiale

Le béton est un matériau qui présente un comportement quasi-élastique qui dure jusqu'à (40 %) de sa contrainte limite en compression ($\sigma_{\max}$), avant d'entamer la zone de comportement non-linéaire, (figure-I-3). Sur la même figure, nous remarquons l'existence de deux parties [03] :

- ✓ Une partie ascendante durant laquelle le béton ne contient que des microfissures non visibles à l'œil nu.
- ✓ Une partie descendante dite d'adoucissement où nous voyons l'apparition de macrofissures au niveau de la surface.

Lors de l'essai de compression, l'endommagement est localisé dans une certaine région. En dehors de cette zone, le béton semble intact même après la fin de l'essai.

L'évolution des fissures dans les bétons sollicités en compression a été étudiée par Hsu et al. En examinant au microscope des disques de béton extraits de différents échantillons testés, ils ont pu montrer l'existence de deux mécanismes responsables de la fissuration interne :

- ✓ Dans le premier, la création et la propagation des microfissures se fait au niveau de l'interface grain-matrice.
- ✓ alors que dans le deuxième elle s'effectue dans le mortier enrobant les grains les plus grossiers [06].

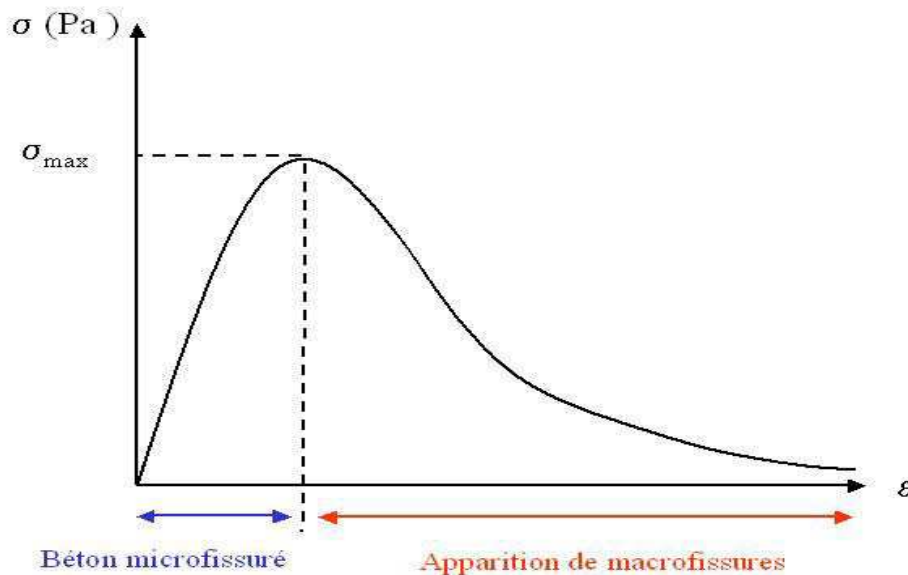


Figure-I-4-Courbe contrainte-déformation de béton soumis à une compression uniaxiale.

CHAPITRE-II-

LA FISSURATION DANS LE BÉTON

Partie-A-

Les fissures.

La performance de béton ne doit pas être jugée seulement en fonction de sa résistance en compression, toute structure doit être durable, capable de maintenir un niveau de service pour une certaine période de temps : la structure doit résister durant sa vie utile aux forces appliquées et aux effets de son environnement sans subir de détériorations excessives ou de ruptures.

La fissuration, ou n'importe quel changement néfaste des propriétés mécaniques, physiques ou chimiques de la surface ou de l'intérieur d'une masse de béton, peut-être associé à une des phases de vie d'une structure: conception, construction ou exploitation. Les effets peuvent être visibles ou non et apparaissent sous formes différentes qui peuvent apparaître séparément ou simultanément (la désintégration, l'éclatement, la fissuration...).

Dans ce chapitre, l'emphase sera mise sur la fissuration qui affecte les propriétés du béton, une revue non exhaustive des principaux travaux qui ont traité les fissures dans le béton.

II-1-Les fissures

« La fissuration n'est pas une maladie, mais le symptôme d'une maladie « symptôme qui, pour le béton n'est guère plus spécifique que la fièvre pour les humains . Aucun médecin praticien n'est spécialiste en fièvre, on élimine la fièvre en soignant les maladies les plus diverses » [07]. En effet, la faible capacité de déformation et la faible résistance en traction rendent le béton très sensible à la fissuration. Une fissuration non prise en considération lors de la conception de la structure et donc non contrôlée peut provoquer des effondrements et provoquer des pertes humaines et des dégâts.

II-2-Origines de la fissuration

La fissuration de béton peut être comparée à la rupture du maillon le plus faible d'une chaîne mise en tension, elle peut être due à des diverses provenances qu'on peut classer en trois grandes familles :

- ✓ Origines mécaniques ;
- ✓ Origines physico-chimiques ;
- ✓ Origines thermiques.

II-2-1-Origines mécaniques

La fissuration peut se produire par compression, traction, cisaillement, flexion, aussi bien sous chargement statique, sous l'effet des charges, des surcharges ou lors de déplacement des charges.

Le processus de fissuration peut se décliner de multiples façons :

II-2-1-1-Fissures causées par des pratiques douteuses de construction

Des fissures peuvent se former si les règles de l'art de la construction des ouvrages en béton ne sont pas respectées. La plus douteuse de ces pratiques est l'ajout d'eau au béton pour améliorer sa maniabilité. Cette pratique engendre des effets néfastes comme une perte de

résistance ou une augmentation de retrait. Si en plus on augmente la quantité de ciment pour contrecarrer ces effets indésirables, il en résultera une différence accrue entre la température à la surface et celle à l'intérieur de la masse de béton. Ce gradient de température crée des contraintes de traction pouvant éventuellement faire fissurer le béton.

II-2-1-2-Fissures causées par des surcharges durant la construction

Ces surcharges peuvent parfois être beaucoup plus importantes que les charges pour lesquelles les éléments ont été conçus. De plus, ces surcharges se produisent souvent quand le béton est jeune et qu'il est le plus vulnérable.

Les éléments en béton pré-moulés sont particulièrement sujets de cette forme de fissuration. En effet, lors de transport, s'ils ne sont pas manipulés ou entreposés correctement, ils peuvent être soumis à des contraintes pour lesquelles ils n'ont pas été conçus.

Le béton précontraint, pour sa part, peut se fissurer au moment où la précontrainte est enlevée sans se préoccuper de la séquence dans laquelle les câbles sont relâchés.

Quant au béton coulé en place, il peut être soumis lui aussi à des surcharges durant la construction, qui peuvent provoquer des fissures. Ces surcharges sont surtout induites par le stockage de matériel et pour l'opération de certains équipements.

II-2-2-Origines physico-chimiques

II-2-2-1-Ressuage

Le ressuage est un phénomène qui se manifeste avant la prise de béton, il correspond à l'apparition d'une pellicule d'eau claire à la surface libre horizontale de béton frais, (figure-II-1). Cette manifestation est liée à un tassement progressif du squelette sous l'effet de la pesanteur et au compactage.



Figure-II-1-Phénomène de ressuage.

Pour prévenir de ce phénomène, on peut jouer sur le dosage en eau et les dimensions des granulats ; mais il faut surtout veiller à une composition granulométrique de qualité en particulier au niveau des sables.

II-2-2-2-Retrair plastique

Il existe plusieurs types de retrait qui interviennent à des moments différents de la vie d'un béton et qui ont des causes différentes, mais le retrait le plus néfaste sur les structures est le retrait plastique. Il apparaît dans le béton frais durant les premières heures de début du durcissement, (figure-II-2). Pendant ce laps de temps, il ne se produit pas de réactions chimiques importantes de ciment (phase de repos).

Il est causé par une évaporation trop rapide de l'eau en surface qui ne peut pas être compensée par un apport d'eau provenant de la masse de béton sous la surface. Il provoque une forte contraction de la pâte qui fait fissurer la surface externe.

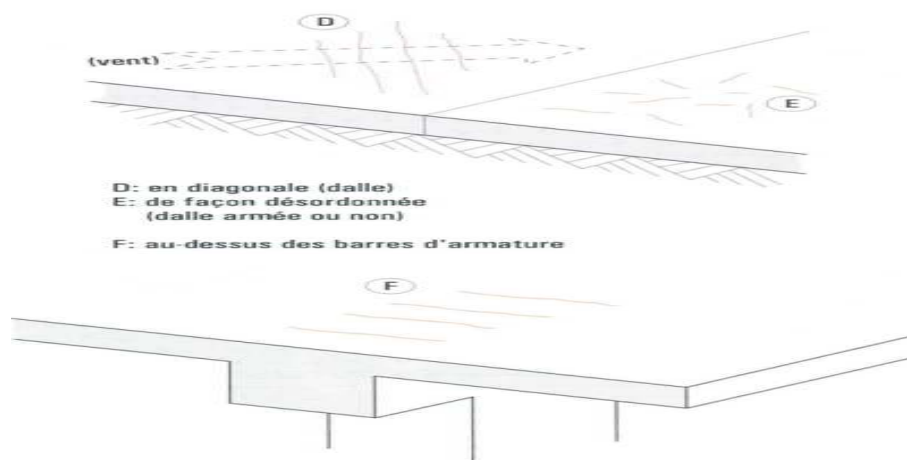


Figure-II-2-Fissures dues au retrait plastique.

Les fissures de retrait plastique peuvent facilement être évitées par:

- ✓ La limitation de l'évaporation au moyen d'un traitement correct, effectué à temps. La norme « NBN B15-001 » indique les durées minimales de cure en fonction des conditions ambiantes, de la température de béton et de la vitesse de développement de la résistance.
- ✓ Recouvrir la surface au moyen d'une feuille de plastique (attention toutefois au vent et aux dégradations possibles sur la texture de la surface).
- ✓ Garder la surface du béton humide, surtout dans le cas d'utilisation de ciment à durcissement rapide (par temps chaud).

II-2-2-3-Corrosion des armatures

Habituellement, l'acier d'armature noyé dans le béton ne se corrode pas puisqu'il est protégé par une couche mince d'oxyde passif protecteur. Cette couche peut être altérée par la carbonatation ou des ions agressifs comme les chlorures. C'est seulement une fois cette passivité altérée que le processus de dégradation peut amorcer la propagation de la corrosion,

avec la formation de produits expansifs entraînant des contraintes de traction dans le béton d'enrobage.

Ces dernières conduisent progressivement à la formation de fissures qui vont favoriser la pénétration d'agents agressifs (figure-II-3), et générer à terme le décollement de béton d'enrobage [08], [09].

Plusieurs auteurs pensent que la corrosion des aciers d'armatures est un phénomène inévitable, inhérent au béton armé. Pour réduire la corrosion des armatures, différentes solutions et agents anticorrosion sont régulièrement proposés sur le marché, et certaines compagnies font la promotion de la protection intégrale d'une structure en utilisant une protection cathodique très coûteuse.

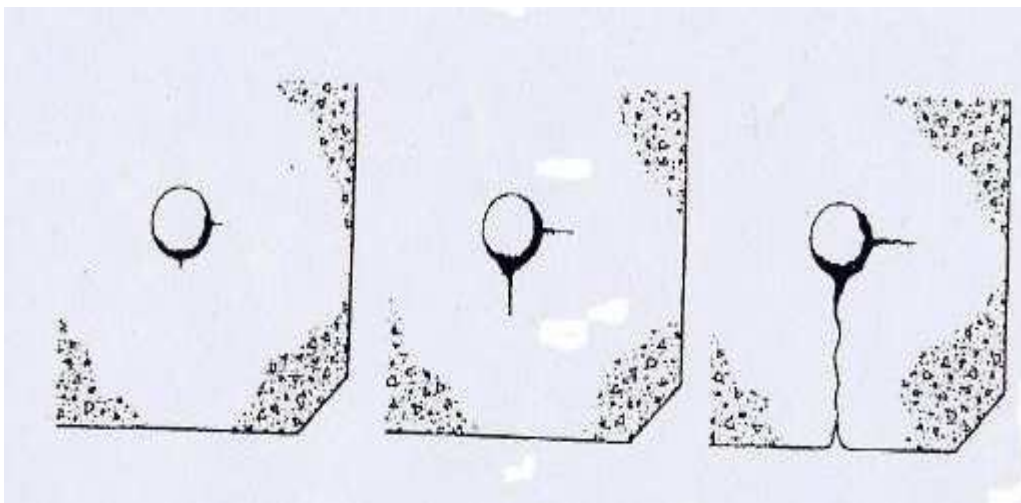


Figure-II-3-Fissures dues à la corrosion des armatures.

II-2-3-Origines chimiques

Cette forme de fissuration est causée par l'expansion des produits de réaction à l'intérieur de la masse de béton durci. Ces produits proviennent des réactions chimiques entre les granulats, le ciment, les adjuvants ou de tous les autres agents entrants en contact avec le béton une fois celui-ci durci. Ces fissures auront ensuite pour effet d'augmenter la perméabilité du béton, ce qui rend le béton encore plus vulnérable. De cette manière, lorsque la silice des granulats et les alcalis de ciment réagissent entre eux, il en résulte un gel expansif qui draine l'eau des autres portions du béton qui cause une expansion locale.

II-2-4-Origines thermiques

Les réactions d'hydratation de ciment, qui sont fortement exothermiques, entraînent une élévation de température au sein du matériau cimentaire ; elle peut atteindre plusieurs dizaines de degrés. Ce cycle s'accompagne d'une dilatation suivie d'une contraction de matériau. Les risques de fissuration s'accroissent avec le volume de matériau et en particulier avec son

épaisseur. On estime qu'au-delà de quatre-vingts centimètres d'épaisseur, la fissuration est quasi inévitable [10].

Parmi les mesures technologiques pour maîtriser l'augmentation de température, on peut citer :

- ✓ Procédé de mise en œuvre : une bonne stratégie de coffrage peut limiter la différence maximale de température entre le noyau et la face extérieure de l'élément en béton, et de cette façon limiter également le risque de fissuration.
- ✓ Choix de type de ciment et de la teneur en ciment: les types de ciment qui développent une faible chaleur d'hydratation, généralement des ciments de haut-fourneau (CEM III) – sont évidemment les plus appropriés. Une faible teneur en ciment pour autant qu'elle soit compatible avec les exigences de durabilité et de résistance limitera l'augmentation de température.

II-3-Formes des fissures

La figure (II-4) illustre des fissures précoces qui peuvent affecter un ouvrage en béton. Chaque lettre indiquée sur la figure correspond à un type de fissure.

L'ensemble de ces types, les causes, le temps ainsi que le lieu de l'apparition et les précautions recommandées contre ces pathologies, sont indiquées dans le tableau.

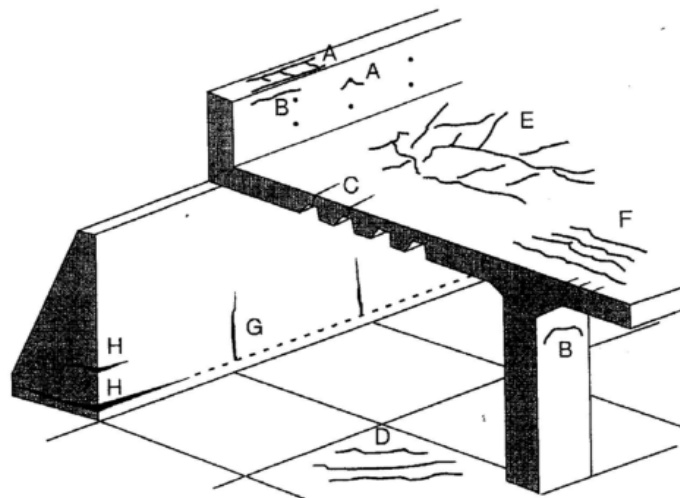


Figure-II-4-Les fissures dans un ouvrage en béton.

Description du phénomène	Ref	Indication complémentaire	Phase signification ou elle se produit	Moment d'apparition/de formation de fissure	Cause principale	Cause complémentaire	Remède/précaution
Sedimentation tassement.	A	Au-dessus des armatures	Grande épaisseur de couche	Une demi-heure jusqu'à quelques heures après le coulage	Ressuage.	Dessèchement rapide	Diminuer le dosage en eau Améliorer la stabilité des mélanges.
	B	Effets du tassement	Partie supérieure de colonnes			Proximité des armatures, forme du coffre.	
	C	Changement de section	Par exemple « cuisson »				
Retrait Plastique	D	Souvent en diagonal	Routes et dalles	Une demi-heure jusqu'à quelques heures après le coulage	Dessèchement prématuré		Post-traitement
	E	Arbitraire					
	F	Au-dessus des armatures	Dalles armées		Idem avec en+ trop peu de couverture		
Retrait thermique dans le béton jeune	G	Déformation externe empêchée	Murs épais	Souvent en une semaine	Grand développement de chaleur	Degrés de refroidissement	Réduire de dégagement de chaleur, refroidissement du béton, isoler éventuellement
	H		Éléments massifs		Grand gradient de température		

Tableau II-1- Fissure dans un ouvrage en béton.

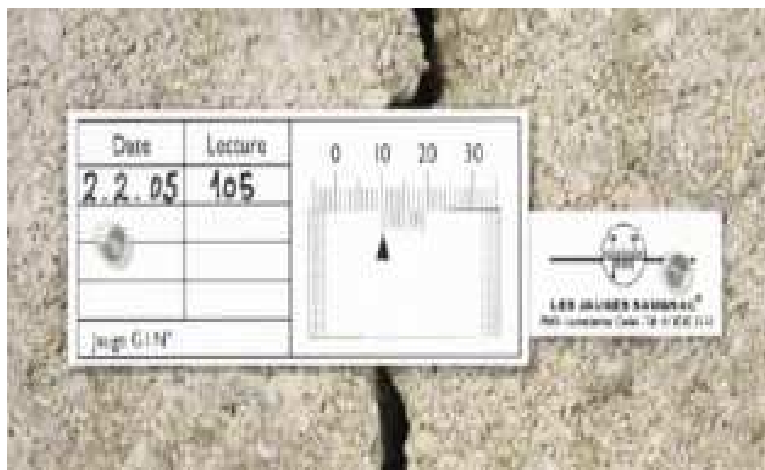
II-4-Méthodes d'investigation des fissures

Avant de réparer et de traiter une fissure, il est primordial de déterminer son emplacement, son étendue, les causes, et la pertinence de la réparer. on doit calculer les contraintes engendrées par les différents cas de chargement, consulter les plans, les devis ainsi que la méthode d'entretien. Pour ce faire, il faut inspecter cette fissure, plusieurs voies sont disponibles :

II-4-1-Inspection visuelle

L'inspection visuelle s'avère un moyen simple et efficace pour déterminer l'emplacement et l'étendue des fissures superficielles. Pour y arriver, il suffit de localiser et de noter l'ouverture des fissures sur un dessin. Il est aussi intéressant de noter l'emplacement des taches de rouilles de l'armature à nue, ou de toutes autres détériorations de surface, si nécessaire, des photographies peuvent compléter l'inspection.

Des outils sont d'ailleurs disponibles pour faciliter ce travail, (figure-II-5). Ainsi, un comparateur de fissures avec ou sans microscope est très utile pour déterminer l'ouverture des fissures, alors que les indicateurs de mouvement, soit mécaniques ou électriques servent à indiquer la direction et la grandeur du mouvement de ces fissures.



- ✓ Analyses chimiques pour déterminer la présence de chlorures pouvant indiquer la corrosion de l'armature.
- ✓ Analyses pétrographiques pour déterminer la présence de produits de la réaction alcali-granulats ou d'autres réactions agressives.

Les trous de forage, quant à eux, peuvent être inspectés pour évaluer avec précision l'ouverture, l'emplacement et l'inclinaison de fissure. Diverses techniques sont accessibles pour ces inspections :

- ✓ Une caméra vidéo que l'on descend dans le trou de forage ;
- ✓ Un périscope qui comprend des tubes et un miroir descendus dans le trou.

II-4-3-Inspection non destructive

De plus en plus maintenant, on utilise les méthodes d'inspection non destructives pour déterminer l'emplacement, l'étendue et la profondeur des fissures ou d'autres détériorations. Diverses méthodes existent déjà, mais pour avoir des résultats plus représentatifs, il est suggéré d'utiliser plusieurs méthodes pour inspecter une structure. Les méthodes non destructives les plus communes pour la détection de fissures ou détériorations internes ont été présentées en détail dans le chapitre -III-.

Partie-B-

**Caractérisation de la
profondeur des fissures
en employant la méthode
des ondes ultrasonores.**

La détermination de la profondeur des fissures peut être exécutée de manière non destructive par la technique à ultrason. Les ondes ultrasonores sont considérablement dispersées par les hétérogénéités dans le béton. Elles sont générées sur un côté de la fissure en parcourant une certaine distance pour être reçues par un transducteur placé sur le côté opposé de la fissure. L'arrivée du pic d'énergie diffusé au niveau du récepteur est retardée en raison de la présence des fissures. Ce temps de retard est le principal indicateur utilisé pour déterminer la profondeur d'une fissure.

Bien qu'il existe d'autres techniques disponibles pour mesurer les caractéristiques géométriques des fissures [11], l'utilisation des ondes ultrasonores est devenue très courante, en raison de sa simplicité, facile à réaliser, et donne une indication rapide sur l'extension de la profondeur de la fissuration. Il existe un nombre important d'instruments à ultrasons disponibles dans le commerce utilisé dans des structures en béton, qui ont tous le même principe qui consiste à déterminer le temps de transit direct d'une onde longitudinale en microsecondes.

II-1-Les méthodes existantes pour la caractérisation de profondeur des fissures

Plusieurs chercheurs avaient mis en marche cette démarche afin de déterminer les caractéristiques géométriques du béton à travers des tests expérimentaux, des analyses numériques et analytiques ont également été employées pour la comparaison [12], [13].

Ces résultats sont en accord avec les expériences de base. En outre, ces analyses sont utilisées pour étudier les limites de cette technique. En particulier, il est montré que cette technique est applicable à des fissures supérieures au libre parcours moyen de diffusion. Trouverant ci-dessous une revue sur ces méthodes et leurs fiabilités sur le terrain.

II-1-1-Méthodes analytiques

Bungey [14] a proposé une expression mathématique en comparant le temps de propagation d'une onde ultrasonore longitudinale d'un béton sain à celui-ci autour d'une fissure, on considère que la vitesse de l'onde longitudinale dans le béton est la même dans les deux cas, la pénétration de la profondeur d'une certaine fissure «H» peut être évaluée en tant que:

$$H = \left(\frac{X}{T_s} \right) \sqrt{T_c^2 - T_s^2} \dots\dots\dots \text{[II-1]}$$

Où T_c : représente le temps de propagation de l'onde autour de la fissure ;

T_s : est le temps de propagation de l'onde sur la surface du béton sain (sans fissure) ;

X : est la plus petite distance entre les transducteurs et la fissure.

Pour utiliser l'équation [II-1], il est nécessaire d'obtenir au préalable le temps de transmission de l'onde longitudinale dans une région sans fissure (T_s), avec des transducteurs à une distance de $(2X)$, écartées l'une de l'autre.

L'hypothèse employée la même vitesse d'impulsions ultrasonores à travers une surface de béton sain, et à travers un parcours de béton fissuré, ce qui peut conduire à des erreurs dans l'estimation de la profondeur de fissure.

Habituellement, les couches de béton haut sont plus poreuses que les parties intérieures en raison de différences dans le règlement des agrégats, des vibrations et également la perte de l'humidité dans l'environnement. Ainsi, il est courant d'observer une petite UPV (the ultrasound pulse velocity) dans la surface de béton que dans les parties internes de la structure. Bungey [15] indique que la profondeur des fissures en utilisant l'équation [II-1], peut être estimée avec une précision de (15%).

Une autre méthode pour estimer la profondeur des fissures est celle présentée dans la norme **BS 1881- Partie 203 [08]**. Cette méthode utilise deux mesures prises par les capteurs placés sur la surface de béton de distances (X) et ($2X$), conformément à la figure (II-6). En supposant que la vitesse de l'impulsion ultrasonore est la même, la profondeur de fissure est donnée par l'Eq [II-2], comme suit:

$$H = X \sqrt{\frac{(4T_1^2 - T_2^2)}{(T_2^2 - T_1^2)}} \dots\dots\dots \text{[II-2]}$$

(T_1) et (T_2) sont les temps de propagation de l'onde longitudinale avec des transducteurs placés symétriquement à partir de l'ouverture de la fissure à des distances (X) et ($2X$) respectivement.

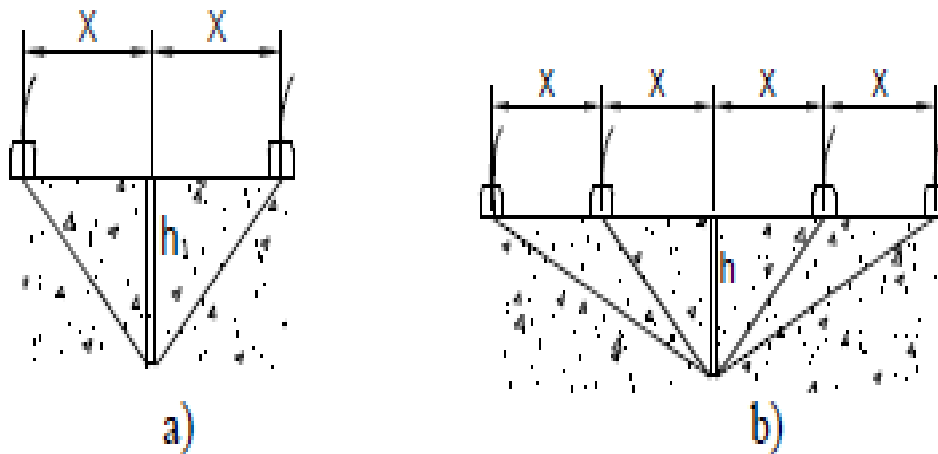


Figure-II-6-Évaluation de la profondeur de fissure conformément au B.S

Cette méthode ne nécessite pas un test complémentaire en béton sain. Cependant, elle est seulement basée sur deux mesures faites avec le mode de transmission indirecte.

II-1-2-Exposé des méthodes graphiques

Dans quelques circonstances, la surface des éléments fissurés n'est pas accessible, et donc on n'arrive pas à mettre en place un parmi les transducteurs, Afin de surmonter cette incohérence apparente, des méthodes graphiques ont été développés pour obtenir la

pénétration de la profondeur de fissures sur la base de mesurer plusieurs temps à travers l'ultrason.

- ✓ **Méthode -A-** : La première méthode est une extension de la méthode présentée dans la norme « **B.S1881** », mais avec prises de plusieurs mesures.
- ✓ **Méthode -B-** : La seconde a été développée spécifiquement lorsque la fissure se trouve à proximité de côté de l'élément en béton tel qu'il n'y a pas assez d'espace disponible pour placer les deux transducteurs symétriquement par rapport au point d'ouverture de fissure. Ainsi, un transducteur reste stationnaire tandis que l'autre varie sa position.

II-1-2-1-Méthode -A-

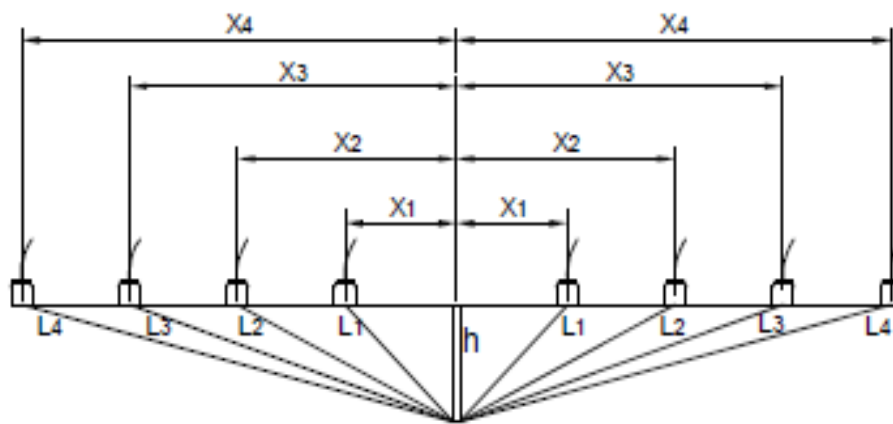


Figure-II-7- mode opératoire de la méthode -A-

Dans ce procédé, les transducteurs sont placés équidistants de point d'ouverture de la fissure le long d'une ligne choisie (figure-II-7), de façon similaire à la méthode « **B.S 1881** », mais avec au moins quatre postes suggérés par Yaman et Al [08].

La figure (II-7) montre une disposition possible des transducteurs, Les lectures de temps de propagations sont effectuées à chaque disposition, le temps de transmission peut être exprimé par:

$$T_i = \frac{2L_i}{V} \dots\dots\dots \text{[II-3]}$$

T_i : temps de transmission en (s) mesuré à une distance (X_i) à partir de la fissure ;

V : la vitesse de l'impulsion ultrasonique (m/s) ;

L_i : la moitié de la longueur de déplacement correspondant à T_i , qui dépend de la distance (X_i) et (H).

Si l'on substitue(L_i) dans l'équation [II-3] par sa dépendance à (X_i) et (H), l'expression suivante peut être trouvée:

$$H = \sqrt{V^2 \frac{T_i^2}{4} - X_i^2} \dots\dots\dots \text{[II-4]}$$

II-1-2-2-Méthode -B-

Une variante de la méthode ci-dessus peut être utilisée lorsque la fissure se produit à proximité d'un côté de l'échantillon. Dans ce cas, l'émetteur est fixé à un côté de la fissure, tandis qu'on déplace le récepteur sur plusieurs endroits du côté opposé de la fissure.

Selon la Figure (II-8), la première position devrait avoir deux transducteurs équidistants de l'ouverture de la fissure, tandis que pour les autres, le récepteur est déplacé par incréments fixes. Pour chaque arrangement, une lecture de temps de propagation est prise.

En utilisant les mêmes hypothèses concernant le parcours de transmission et de la vitesse d'impulsion ultrasonique utilisée dans la méthode précédente, la profondeur de la fissure peut être calculée en fonction de la relation :

$$H = \sqrt{V^2 \left(T_i - \frac{T_1}{2} \right)^2 - X_i^2} \dots \dots \dots \text{[II-5]}$$

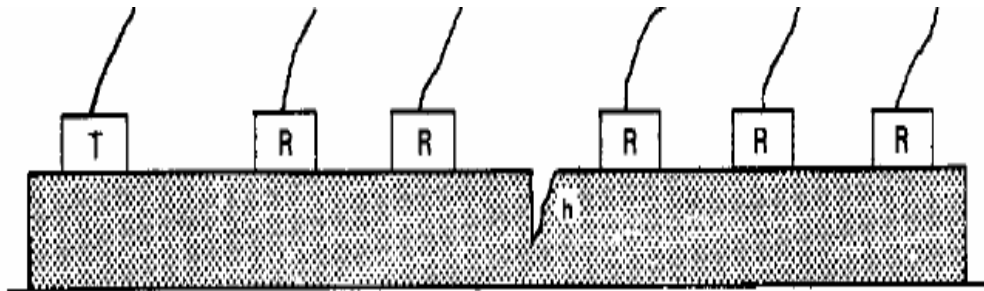


Figure-II-8- mode opératoire de la méthode -B-

Partie-C-

Réparation des fissures.

Après avoir inspecté la fissure et localisé son impact par rapport au bon fonctionnement de la structure, vis-à-vis de la sécurité, il faut entretenir cette fissure pour limiter son influence sur l'ensemble de l'ouvrage, plusieurs méthodes de réparation et de rhabillage sont disponibles.

II-1-Réparation des fissures

Tous les éléments et toutes les structures de béton peuvent se fissurer, les fissures sont souvent bénignes, mais il arrive qu'elles affectent :

- ✓ L'esthétique ;
- ✓ L'étanchéité ;
- ✓ La durabilité ;
- ✓ L'intégrité structurale.

C'est d'ailleurs pour ces raisons qu'on décide de réparer le béton fissuré mais avant de procéder à des réparations, il est impératif de déterminer :

- ✓ Le but de la réparation ;
- ✓ La cause de la fissuration ;
- ✓ L'activité due à la fissure (active, morte ou progressive et l'ouverture de la fissure) ;
- ✓ L'état des supports ;
- ✓ Les produits disponibles sur le marché ;
- ✓ Les effets de la réparation sur toute la structure ;
- ✓ Les conditions de travail possibles ou réalisables.....

Selon le type de fissure en présence, un traitement n'est pas obligatoire dans toutes les situations. Cela dépend des caractéristiques de la fissure. Lorsque les fissures ne sont pas la conséquence d'un manque d'armatures, il n'est pas forcément nécessaire de les traiter.

Il existe plusieurs techniques de réparation qui doivent être choisies selon les caractéristiques de chaque fissure et de milieu dont elle existe. Dans certains cas, il peut même arriver que l'utilisation de plusieurs techniques devienne nécessaire. Parmi les plus courantes techniques de réparation de fissures, on trouve :

- ✓ Le calfeutrage ;
- ✓ L'épinglage ;
- ✓ L'ajout d'armature (renforcement) ;
- ✓ Le traitement des surfaces et des revêtements ;
- ✓ La technique la plus commode est l'injection.

II-1-1-Calfatage

Cette méthode très simple, utilisée pour réparer des fissures de surface mortes non structurales. Elle consiste à élargir la fissure exposée de manière à la sceller en la remplissant

avec un produit adéquat, comme un polyuréthane, un époxy ou un ciment. La technique est illustrée à la figure (II-9).

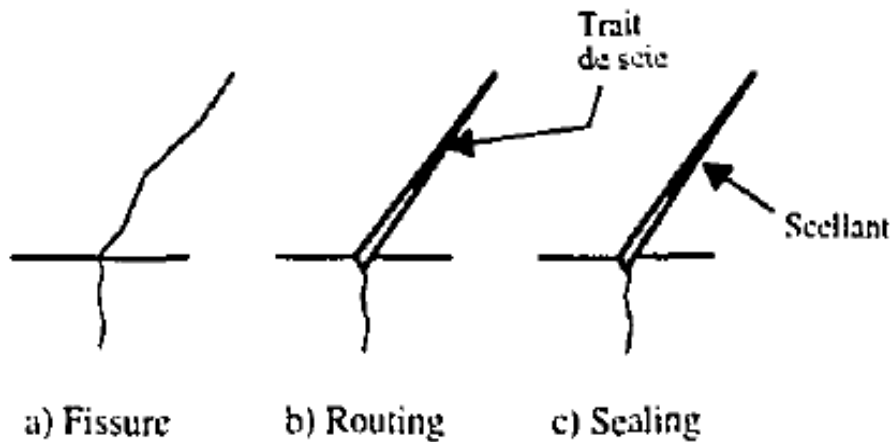


Figure-II-9- La réparation des fissures par la technique de calfatage.

II-1-2-Épingleage

Cette méthode peut être envisagée pour réparer des fissures majeures dans des membrures sollicitées en traction. La procédure exige que l'on fore des trous de chacun des côtés de la fissure, de la nettoyer et d'y insérer des barres d'ancrage en «U». Il est important de se rappeler que cette technique, figure (II-10) ne permet pas de refermer ou de sceller une fissure, elle ne fait qu'empêcher sa propagation. Alors, il faut la sceller avant d'utiliser ce mode de réparation.

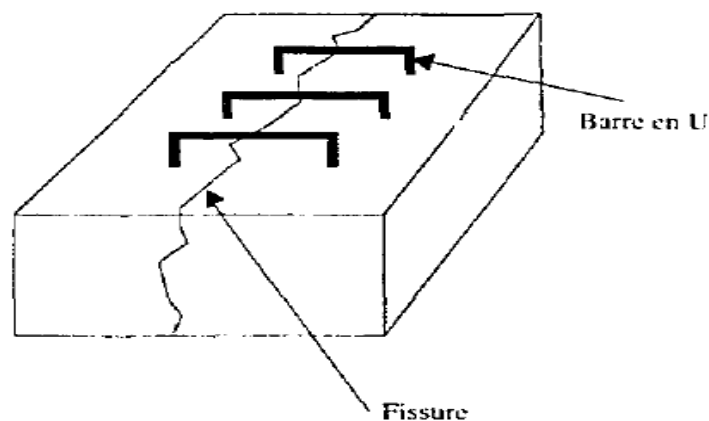


Figure-II-10- La réparation des fissures par la technique de l'épingleage.

II-1-3- Les renforts des structures

Dans le cas où la fissure a un caractère pathologique, c'est-à-dire qu'un risque structurel est présent, il est nécessaire de renforcer la structure.

La structure existante étant un ouvrage fini, ces renforts vont pour être réalisés aux moyens:

- ✓ De lamelles à base de fibre de carbone ;
- ✓ De profilés métalliques ;

✓ D'un poteau supplémentaire....

Dans les cas extrêmes, c'est-à-dire quand la structure présente un véritable danger pour son utilisation, on peut être obligé de démolir une partie, ou tout l'ouvrage avant de le reconstruire.

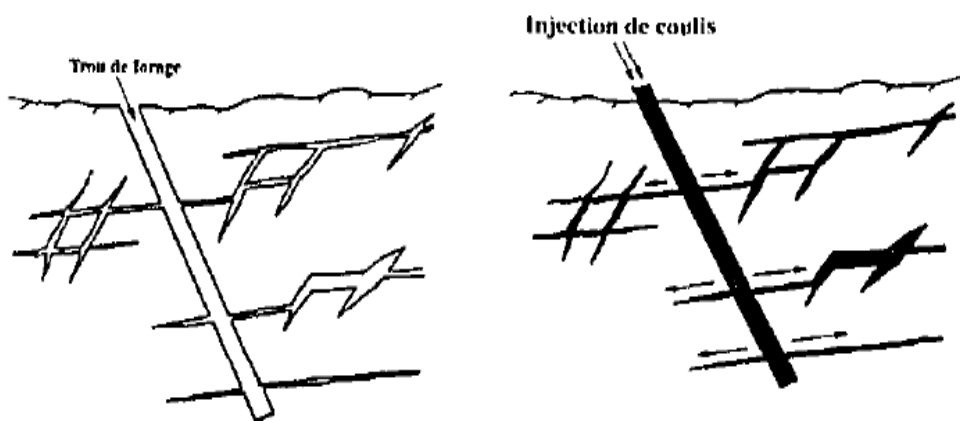
II-2-L' Injection

L'injection est aussi une méthode de réparation très prisée, il s'agit de faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique, et ou une étanchéité entre les parties disjointes pour reconstituer le monolithisme de l'ouvrage.

II-2-1-Types d'injection

L'injection est une méthode de réparation qui consiste à injecter du coulis, un produit qui durcira dans des cavités, dans le sol ou dans des fissures dans le but d'améliorer les caractéristiques de milieu injecté, augmenter sa résistance ou son imperméabilité.

Le concept en lui-même est très simple: on fore des trous que l'on remplit avec du coulis sous pression, la figure (II-11) illustre le procédé. Par contre, certains auteurs comme **Houlsby** considèrent que, même si cette technique fait partie de l'ingénierie, elle tient plus de l'art. En effet, durant une injection, il est pratiquement impossible de suivre directement la pénétration puisqu'on ne peut pas voir ce qui se passe.



a -Forage d'un trou

b-Injection du forage

Figure -II-11-Trou de forage interceptant des fissures.

Outre la réparation de fissures dans le béton, on peut utiliser l'injection à d'autres fins, notamment pour:

- ✓ Réduire la perméabilité des fondations des barrages ;
- ✓ Prévenir l'érosion des sols de la fondation ;
- ✓ Augmenter la résistance du sol sous les fondations ;
- ✓ Remplir les joints de construction entre des masses de béton ;
- ✓ Réparer les effets de la subsidence sous les structures ;

- ✓ Bétonner dans des endroits difficiles d'accès ;
- ✓ Remplir des ancrages dans le sol, le roc ou le béton ;
- ✓ Remplir des cavités que le béton n'a pu remplir.

Qu'arrive-t-il durant l'injection?

Évidemment, le coulis d'injection ne circule pas comme l'eau dans les fissures. En effet, la plupart des coulis (chimiques ou à base de ciment) ont soit des particules et, ou une viscosité plus élevée que l'eau.

II-2-1-1-Fissures d'ouverture appréciable

Les fissures d'ouverture appréciable (plus de **2 mm**) ne peuvent pas être toutes injectées avec la même aisance. En effet , on peut les séparer en fissures :

- ✓ horizontales ;
- ✓ inclinées ;
- ✓ Verticales.

Parmi ces trois types, ce sont les fissures horizontales qui sont le plus difficile à injecter, au début le coulis peut bouger sans encombre sous l'influence de la pression dans le trou.

A mesure que le coulis s'éloigne du trou d'injection, l'influence de la pression s'amenuise et la pénétration devient de plus en plus difficile figure (II-12-a).

Éventuellement, la limite de la pénétration du coulis sera atteinte quand la pression ne sera plus capable d'induire quelque mouvement, Figure (II-12-b). Pendant ce temps, le coulis continue à entrer dans la fissure, mais ceci laisse peu de chance à l'eau de ressuage de s'évacuer.

Comme le coulis ne bouge presque plus, il commence donc a durcir et l'eau de ressuage s'en sépare, mais elle n'a pas de place pour s'échapper verticalement, elle doit s'échapper latéralement, ce qui crée des méandres et des cordons, donc le dépôt du coulis a cette limite est de mauvaise qualité figure (II-12-c).

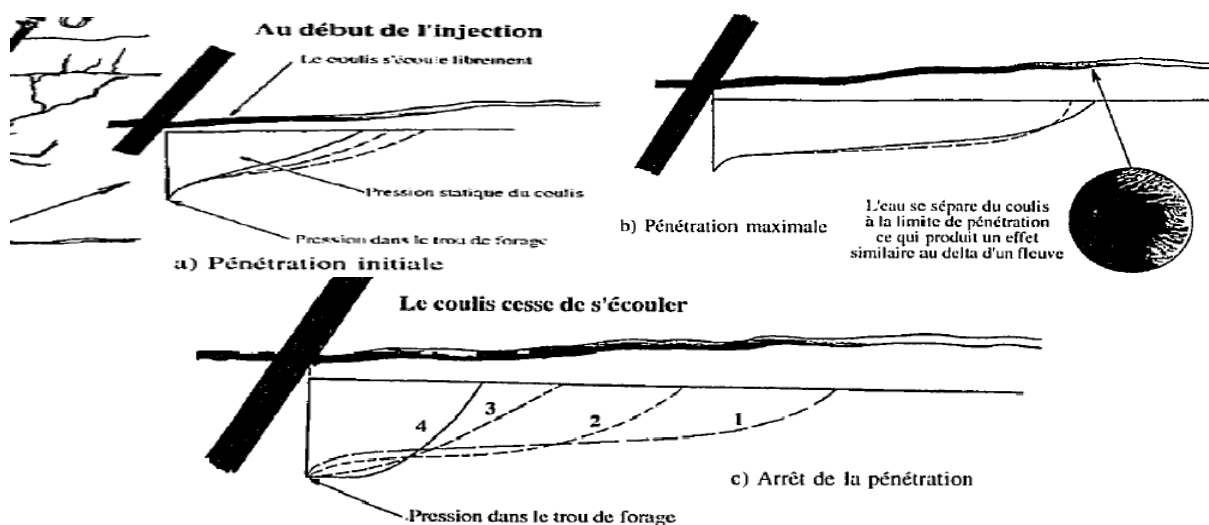


Figure -II-12-Injection d'une fissure horizontale.

Quant aux fissures verticales, où le drainage est possible, le coulis se propage généralement de façon radiale en suivant le trajet qui offre le moins de résistance. Les parties les plus ouvertes sont donc remplies en premier et une fois que celles-ci sont pleines de coulis, les fissures plus fines vont commencer à se remplir à leurs tours. C'est pourquoi qu'habituellement les fissures verticales sont mieux injectées, (figure II-13).

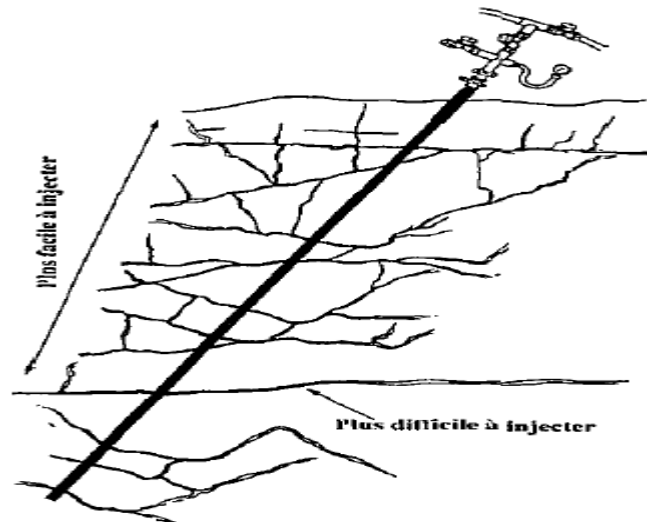


Figure -II-13- Injection des fissures verticales, et des fissures inclinées.

II-2-1-2-Fissures fines

Les fissures fines sont des fissures d'ouverture inférieure à **(1 mm)**, peuvent aussi être injectées. Pour ces injections, il est souvent prescrit d'utiliser des produits chimiques qui ne contiennent pas de particules libres qui nuisent à la pénétration. Cependant des coulis à base de ciment portland ou mieux encore des coulis à base de ciment micro fin peuvent aussi être injectés, figure (II-14). Dans ces deux derniers cas, il est impératif d'utiliser des coulis de haute qualité obtenus en ajoutant des super-plastifiants et en les mélangeant avec des malaxeurs à haute énergie.

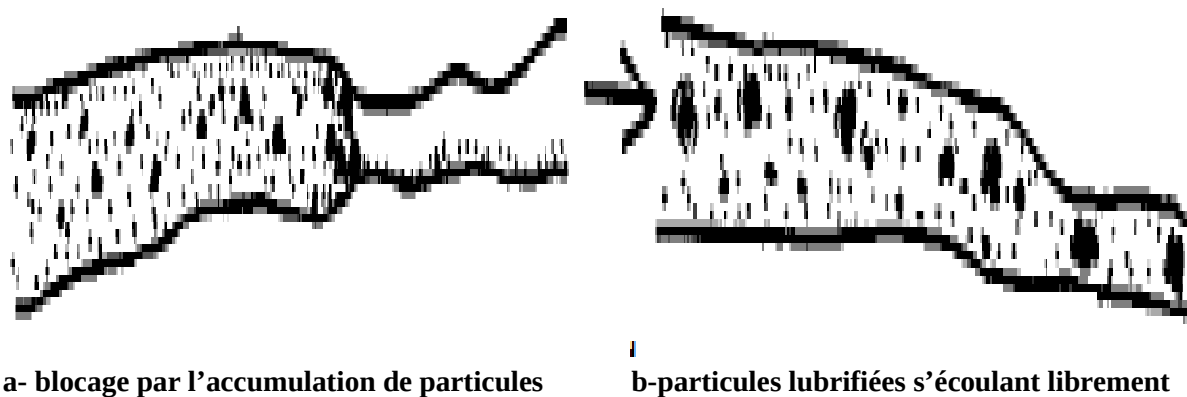


Figure -II-14-Injection des fissures fines.

II-2-2-Temps d'injections

Les divers éléments d'une structure soumis à des variations de température ou à des charges cycliques ou variables se déforment, exigeant de celui qui les répare de déterminer à quel(s) moment(s) et quel(s) produit(s) sont les plus propices pour une injection.

Pour effectuer une réparation durable et de qualité, il faut s'assurer que la fissure a injecté n'est pas progressive puisqu'une telle réparation ne sera que temporaire; il est en effet plus facile de réparer des fissures mortes, contrairement aux fissures actives, les fissures mortes ne requièrent pas une attention particulière quant au choix du moment pour les injecter puisqu'elles n'évoluent pas dans le temps, (figure II-15).

Quant aux fissures actives qui s'ouvrent et se referment selon les conditions d'exposition, on doit s'assurer, qu'en plus de choisir un produit adéquat, d'injecter ces fissures à un moment où elles sont le plus ouvertes. En effet, il arrive souvent après une injection ayant eu lieu quand la fissure est trop refermée et lorsque celle-ci commence à s'ouvrir que le produit de réparation ou le béton environnant cède en traction. Par contre, si le produit est injecté au moment où la fissure est la plus ouverte, il pourra travailler en compression et transmettre les efforts.

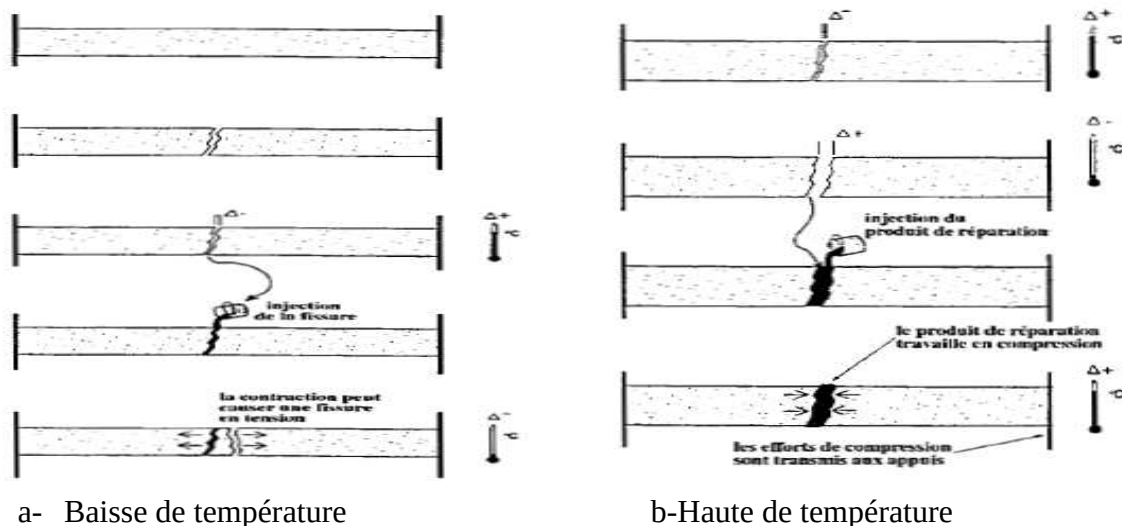


Figure -II-15-Effets de la température sur l'injection.

II-2-3-Produits propices

Le choix des matériaux dépend des conditions d'utilisation, ainsi l'utilisation d'un produit peut être très pertinente pour une réparation dans des conditions précises ; mais tout à fait inadéquate dans d'autres circonstances. Une large gamme de produits se retrouve sur le marché, et on les regroupe généralement en deux catégories: produits chimiques ou produits à base de ciment. Le produit d'injection idéal aurait les caractéristiques suivantes :

- ✓ À prix abordable, non toxique , non corrosif, non explosif;
- ✓ Stable à des températures normales, temps de prise contrôlable.

- ✓ Insensible aux différents sels trouvés dans l'eau souterraine et aux composants du béton environnant;
- ✓ Un pH qui s'apparente à celui du béton;
- ✓ Prise possible en présence d'eau à basse température;
- ✓ Haute résistance en traction, en compression et au cisaillement permanent et durable ;

Évidemment, il n'existe aucun produit qui puisse répondre à toutes ces exigences, mais beaucoup de produits disponibles sur le marché peuvent posséder plusieurs de ces caractéristiques et il importe à celui qui les utilise de déterminer lesquelles sont les plus critiques et de faire son choix du produit en les respectant. Cependant, on doit utiliser ces produits avec précaution surtout dans le cas de fissures saturées d'eau et à basse température étant donné qu'ils démontrent généralement des problèmes d'adhérence aux surfaces mouillées, des problèmes de prise à des températures inférieures à 5°C et des viscosités qui augmentent rapidement au fur et à mesure que la température baisse.

CHAPITRE-III-

LES MÉTHODES NON DESTRUCTIVES DANS LE BÉTON.

Partie-A-
Les méthodes non
destructives.

L'ensemble des ouvrages de génie civil, de petits ouvrages simples aux grands ouvrages d'art comme les ponts ; ou les ouvrages particulièrement sensibles (enceintes de confinements, centrales nucléaires) est un patrimoine vieillissant, dont certains atteignent une cinquantaine d'années. Ils sont exposés aux divers problèmes : risque d'accident allant jusqu'à des effondrements, dégradations, endommagements...etc. Ces problèmes doivent donc être détectés le plus tôt possible pour éliminer les risques, et limiter les coûts de réparation et de réhabilitation.

Certains ouvrages peuvent également parvenir en bon état en termes de la durée de vie pour laquelle ils ont été conçus, mais l'évaluation de l'état de santé de ces ouvrages peut permettre de décider ou non de prolonger leurs exploitations.

L'ensemble des méthodes d'évaluation de béton, qu'elles soient destructives ou non destructives, peut alors apporter un diagnostic précieux aux exploitants de l'ouvrage. Elles peuvent, suivant leurs précisions, être utilisées pour simplement détecter une altération des caractéristiques des matériaux, localiser une zone endommagée, l'étendue de l'endommagement, ou même quantifier l'évolution de cet endommagement au cours du temps et prédire les évolutions futures.

III-1-Généralités sur les méthodes non destructives

Initialement, développées dans les années 1960 pour répondre aux besoins des secteurs de pointe (tel que le nucléaire). Les méthodes de contrôle non destructif ont vu leurs emplois se généraliser à l'ensemble du monde de la construction et le monde industriel.

On regroupe sous le vocable contrôle non destructif « **CND** », ou encore les essais non destructifs « **END** », l'ensemble des techniques et méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité des structures ou des matériaux, sans les dégradés, et sans qu'il en résulte des altérations préjudiciables à leurs utilisations ultérieures : soit au cours de la production, soit au cours d'utilisation, ou dans le cadre de maintenances.

En ce sens, les essais non destructifs (**END**) apparaissent comme un élément majeur de contrôle de la qualité des structures. Ils se différencient de l'instrumentation de laboratoire puisque l'objet est de détecter des hétérogénéités et des anomalies plutôt que de mesurer des paramètres physiques tels que le poids ou la masse.

III-2-Développement des techniques de contrôle non destructif

Les recherches menées pour le développement des techniques représentent aussi un volet qui permet aux outils de couvrir de nouveaux champs d'investigations. Des méthodes de plus en plus performantes autorisent des diagnostics de plus en plus adaptés aux besoins, plusieurs voies sont exploitées :

- ✓ Le développement propre des techniques adaptées à de nouveaux objets, avec de meilleures caractéristiques métrologiques (par exemple : la caractérisation de l'orientation des fibres métalliques dans les bétons de fibres, ou l'étude des fissures).
- ✓ Le développement de nouveaux modes de traitement pour optimiser la caractérisation des objets, et des altérations (par exemple : l'utilisation des réseaux de neurones pour déterminer par radar le diamètre des aciers).
- ✓ Le développement technologique pour l'amélioration des cadences de mesures, ou de l'ergonomie (par exemple : le développement d'automates permettant de réaliser une ou plusieurs mesures à la fois).

III-3-Combinaison des essais non destructifs avec d'autres méthodes

Afin d'obtenir l'information la plus complète, et étant donné, les possibilités de chacune des méthodes, l'exploitation des résultats peut être faite de différentes manières. On les combine souvent à d'autres sources, afin d'en faciliter l'interprétation ou d'en enrichir le contenu :

✓ **Couplage avec d'autres CND**

La combinaison de données issues de différentes méthodes peut permettre de limiter les hypothèses et d'affiner l'interprétation.

✓ **Couplage avec des méthodes destructives ou semi-destructives**

La technique CND permettant des mesures relatives, un recalage des valeurs par rapport à une donnée absolue (déterminée généralement par un essai destructif), permet de quantifier les valeurs en tout point de la surface auscultée. Les méthodes d'auscultation non destructives sont donc souvent intégrées dans une « **Stratégie d'auscultation** » réfléchie, qui combine les résultats de mesures à d'autres sources d'information.

III-4-Secteurs d'application des méthodes non destructives

À l'heure où la qualité est devenue un impératif difficilement contournable, le champ d'application des **CND** ne cesse de s'étendre au-delà de son domaine d'emploi traditionnel constitué par les industries métallurgiques et les activités où la sécurité est primordiale, telles que le nucléaire et l'aéronautique vers des différentes applications dans les différents domaines tel que:

✓ **Génie Civil - Ponts & Chaussées**

Béton, béton armé, bâtiments divers, centrales nucléaires, ...
Etat des routes, des ponts, des pistes d'atterrissage, ...

✓ **Industries du bois et du papier**

Planches, meubles, constructions, cartons, feuilles, ...

✓ **Industries de production**

Métaux, polymères, céramiques, verres, structures complexes, pièces de fonderie, ...

✓ Industries du transport

Ferroviaire, Automobile, Naval, Aéronautique, Aérospatial

✓ Médical

Contrôle de tout le corps humain (os, poumons, dents, ...) par échographie, radiographie, ...

✓ L'industrie pétrolière

Pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs...

Les agents qui effectuent ces contrôles peuvent être certifiés selon les normes en vigueur, si la réglementation l'exige, si le client le demande, ou si l'entreprise utilise ce moyen comme assurance de la compétence de ses opérateurs dans le cadre de sa politique de qualité.

III-5-Application des essais non destructifs pour le béton.

L'auscultation d'un ouvrage est un ensemble d'examen et de mesures spécifiques destinés à établir un diagnostic de l'état d'un bâti [16]. Dans l'absolu, le premier intérêt d'une auscultation est de vérifier la fiabilité immédiate d'un ouvrage.

La notion de risque liée à une construction doit rester au premier rang des préoccupations du gestionnaire. Mais, il existe plusieurs raisons susceptibles de motiver une auscultation :

- ✓ Sur un ouvrage a priori sain, il s'agit d'estimer, de vérifier, ou de contrôler les caractéristiques de la construction.
- ✓ Sur un ouvrage supposant endommager, l'auscultation peut être utilisée pour détecter l'extension de cet endommagement.

III-5-1-Objectifs des essais non destructifs

L'objectif principal des essais non destructifs appliqués au béton est de fournir une évaluation correcte de la qualité du matériau dans sa structure même, quel que soit son âge ou son état de dégradation, sans passer par un recours aux résultats d'éprouvettes qui ne représentent pas forcément la structure exacte de béton d'ouvrage. Ou bien dans le cas des petites structures dont le carottage est quasiment impossible, l'utilisation de ces méthodes est faite pour éviter la dégradation causée par les méthodes destructives, et obtenir des informations dans les domaines inaccessibles aux méthodes classiques.

Ces essais ont la particularité de pouvoir être répétés au même endroit, ce qui permet de suivre les changements des caractéristiques du béton dans le temps.

III-5-2-L'apport des techniques non destructives pour la caractérisation de béton

Ces techniques sont adaptées aux conditions de mesures sur site, elles sont généralement rapides à mettre en œuvre, et d'un coût raisonnable [17]. L'ensemble de ces atouts permet de les utiliser en continu lors de l'étude d'ouvrages de grandes dimensions.

Il s'agit en général de mesurer des grandeurs physiques locales, pour ensuite en déduire des propriétés mécaniques, ainsi pour obtenir des informations de différentes natures vis-à-vis de désordres tels que :

- ✓ **La détection** (repérer une altération des caractéristiques du matériau) ;
- ✓ **La localisation** (préciser le site de l'altération par rapport à la zone auscultée) ;
- ✓ **L'étendue** (préciser les limites géométriques de cette altération) ;
- ✓ **La caractérisation et la quantification** (déterminer le type d'altération observé, et donner l'importance de l'altération, par exemple : caractériser l'ouverture d'une fissure, ou le degré d'activité d'une corrosion d'armature) ;
- ✓ **Le suivi dans le temps** (être capable d'observer une éventuelle évolution dans le temps de la gravité ou de l'étendue de l'altération, au cours des mesures successives).

L'utilisation de ces méthodes se fait pour éviter la dégradation des structures causées par les méthodes destructives et afin d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques. Elles ont aussi la particularité d'économiser des matériaux, du temps et des outils d'essais, par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvette un nombre pratiquement infini de fois.

III-6-La méthode ultrasonore dans le béton (diffusion multiple)

Lorsqu'une onde interagit avec une hétérogénéité du matériau, elle subit de la diffraction, une partie de son énergie est déviée et redistribuée dans tout l'espace alors que l'autre partie se propage dans la même direction que l'onde incidente avec une amplitude plus faible, (figure III-1). Cet effet de diffraction est plus ou moins marqué suivant la fréquence de l'onde et le contraste entre l'hétérogénéité et le milieu avoisinant. Il est maximal lorsque la longueur d'onde (λ) devient comparable à la dimension caractéristique de l'hétérogénéité D.

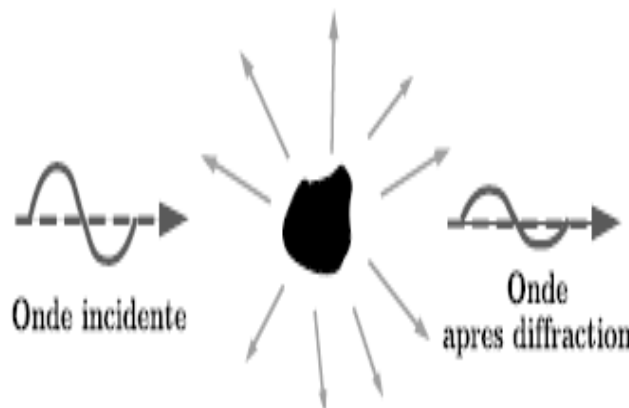


Figure III-1- Diffraction d'une onde ultrasonore par une hétérogénéité.

Dans le cas de béton, les hétérogénéités peuvent être la porosité de la pâte de ciment, ou les inclusions comme le sable et les granulats. Ces hétérogénéités sont très nombreuses, de natures différentes et de dimensions différentes. Elles influent la propagation des ondes ultrasonores à différentes échelles, (figure III-2). On parle alors de **diffraction multiple**, ou plus communément de **diffusion multiple**.

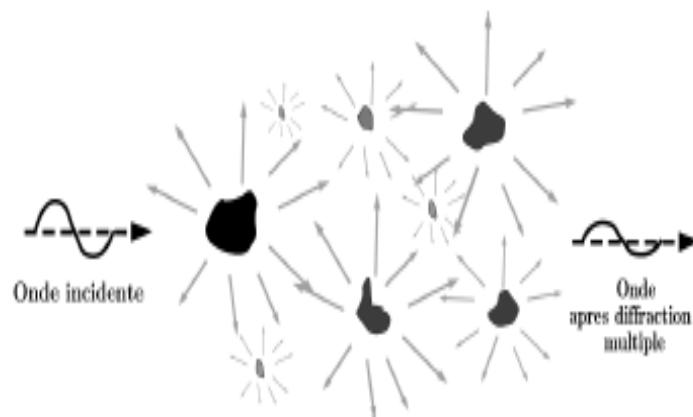


Figure III-2- Diffusion multiple (Diffraction) des ondes ultrasonores par les hétérogénéités.

Les ondes diffractées par les hétérogénéités subissent à leurs tours d'autre événement de diffraction, et peuvent ainsi parcourir une grande distance à l'intérieur du matériau, le long d'un chemin tortueux, et éventuellement parvenir au point d'observation. Puis c'est rare que l'onde ait parcouru une trajectoire directe.

Borne, propose de travailler sur une diffusion simple [18], [19]. Cette approximation n'est valable que pour des milieux faiblement chargés en diffuseurs (de l'ordre de 5%). Il est donc essentiel dans le cas fortement hétérogène comme le béton, d'utiliser la diffusion multiple.

De nombreux auteurs [20], [21], proposent des modèles d'homogénéisation adaptés dans lesquels on ne considère pas une distribution spatiale des diffuseurs, mais un ensemble de distributions dont on extrait des caractéristiques moyennes.

I-7-Modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans le béton.

Les ondes ultrasonores se propagent dans le béton subissent une divergence géométrique, due à la morphologie du faisceau, une dispersion sous forme de chaleur, ainsi que de la diffusion par interaction avec l'ensemble des diffuseurs qu'elles rencontrent (granulats, les grains de sable, les fissures et les microfissures voire les barres de renfort).

Selon la longueur d'onde (λ) comparée à la taille des diffuseurs (d), les interactions peuvent être classées en trois domaines qui sont dits de :

- ✓ Rayleigh pour $\lambda \gg d$;
- ✓ Stochastiques pour $\lambda \approx d$;
- ✓ Géométrique pour $\lambda \ll d$;

Les longueurs d'ondes utilisées pour le béton sont de l'ordre de **5 mm** à **100 mm** avec des fréquences de l'ordre de **10 kHz** à **100 KHz**, se situe dans le domaine stochastique pour lequel les phénomènes de diffusion sont importants.

En se limitant à ce dernier phénomène qui modifie la vitesse et l'atténuation des ondes dans l'espace, l'énergie du faisceau peut être transférée en :

- ✓ Ondes transmises cohérentes rentrant dans le champ de calculs statistiques qui conduisent à l'homogénéisation du matériau ;
- ✓ Ondes transmises incohérentes dite coda, analysées par différentes méthodes ;
- ✓ Ondes rétrodiffusées porteuses des bruits liés aux différentes interactions onde-diffuseurs.

Waterman et Truell proposent un modèle d'homogénéisation [22], il permet de calculer la vitesse et l'atténuation du matériau équivalent à partir des données propres des différents constituants. Il prend en compte des diffuseurs moyens. Le champ moyen est alors donné par:

$$\langle \varphi \rangle = \varphi_0 \cdot e^{i \cdot k^* \cdot \vec{r}} \quad \text{[III-01]}$$

φ_0 : une constante ; $\vec{r}$ la position d'observation ; et k^* le nombre d'onde équivalent dans le milieu effectif de l'onde de compression.

$$k^* = \frac{\omega}{c_p^*} + i \cdot \alpha^* \quad \text{[III-02]}$$

Avec : c_p^* la vitesse de phase ; α^* l'atténuation de l'onde en fonction de la fréquence dans le matériau équivalent.

k^* est déduit de la connaissance du nombre d'onde dans la matrice k_1 .

$$\left(\frac{k^*}{k_1} \right)^2 = \left[1 + \frac{2\pi n_0 \langle f(0) \rangle}{k_1^2} \right]^2 - \left[\frac{2\pi n_0 \langle f(\pi) \rangle}{k_1^2} \right]^2 \quad \text{[III-03]}$$

k_1 , et k^* sont respectivement le nombre d'ondes de la matrice et du milieu effectif ; n_0 est la densité volumique de diffuseurs.

La fonction d'amplitude est calculée en fonction de l'angle d'observation (θ) à l'aide d'un opérateur spécifique appelé (T-matrix, ou formalisme de Green).

$f_{(0)}$ et $f_{(\pi)}$ sont les amplitudes diffusées en avant et en arrière par un obstacle. Il est possible de moyenner sur des diffuseurs de taille ou /et de nature différente.

I-8-Effet du rapport E/C sur les mesures ultrasonores

L'augmentation du rapport E/C entraîne une augmentation de la porosité, ce qui entraîne une diminution de la densité de béton, donc une diminution de la vitesse de propagation des ondes ultrasonores.

Plusieurs travaux [23], [24] ont proposé des modèles reliant la porosité et les paramètres ultrasonores, mais ils requièrent une connaissance précise de la microstructure de matériau, d'une façon générale, ils ont opté pour :

- ✓ Les porosités peuvent être déduites à partir des vitesses des ultrasons pour des bétons de rapport $E/C \geq 0.5$
- ✓ Les relations entre la vitesse des ultrasons et la porosité des bétons sont décrites par relations linéaires pour des bétons de rapport $E/C \geq 0.5$. Elles deviennent moins

précises en intégrant dans ces relations les bétons de faible rapport E/C . Ce qui semble confirmer l'inaptitude des ultrasons à qualifier les bétons de résistances importantes (E/C faible).

- ✓ Toute fois en fixant le rapport E/C , même pour des valeurs inférieures à **0.5**, on peut estimer la porosité à partir des vitesses. Cette relation reste toujours de type linéaire.
- ✓ Le cas des bétons de rapport $E/C < 0.5$ nécessite des corrélations pour chaque rapport E/C .

I-9-Vitesse des ondes ultrasoniques dans le béton

Dans un milieu homogène, et isotrope, linéaire et élastique, les vitesses des ondes de volume (V_L et V_T pour les ondes longitudinales et transversales) sont reliées aux modules élastiques par:

$$V_l = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad \text{[III-04]}$$

$$V_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}} \quad \text{[III-05]}$$

V_l : vitesse des ondes longitudinales en (m/s).

V_t : vitesse des ondes transversales en (m/s).

E : module d'Young (module d'élasticité) en (N/m²).

ν : coefficient de Poisson (sans unité).

ρ : masse volumique (kg/m³).

Le béton est un matériau largement hétérogène, donc il est loin de satisfaire ces hypothèses.

Cependant, il est possible d'homogénéiser le milieu en effectuant un nombre suffisant de mesures et en les moyennant.

- ✓ Pour des faibles valeurs de porosité, la relation entre la vitesse de l'onde de cisaillement et la porosité [25], peut être approchée par la forme linéaire suivante :

$$V_t \cong (1 - bp) V_{T_0} \quad \text{[III-06]}$$

Avec : P : est la porosité du matériau, V_{T_0} est la vitesse de l'onde du cisaillement du matériau à porosité nulle.

b : est un paramètre empirique qui dépend selon Shkolnik, [26] du coefficient de Poisson du matériau à porosité nulle (ν_0):

$$b_{shko} = 15 \frac{1 - \nu_0}{7 - 5\nu_0} \quad \text{[III-07]}$$

Si on suppose que le coefficient de Poisson varie en fonction de la porosité, l'équation [III-07] devient sous la forme suivante :

$$V_T \cong (1 - b_T p) V_{T_0} \quad \text{[III-08]}$$

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 [25], [26]:

$$16 \left(1 - \frac{V_R^2}{V_L^2} \right) \left(1 - \frac{V_R^2}{V_T^2} \right) - \left(2 - \frac{V_R^2}{V_T^2} \right)^4 = 0 \quad \text{[III-09]}$$

Bergman [27] propose une solution approchée de l'équation [III-08]. Cette approche définit une approximation de la vitesse de propagation de l'onde de Rayleigh en fonction de la vitesse transversale et de coefficient de Poisson du matériau [28].

$$V_R \cong f(v) V_T$$

$$f(v) \cong \frac{0.87 + 1.12v}{1 + v} \quad \text{[III-10]}$$

En substituant l'équation [III-06] dans l'équation [III-10], elle peut être approchée par la forme linéaire suivante :

$$V_R \cong (1 - b_R p) V_{R0} \quad \text{[III-11]}$$

V_{R0} : vitesse de l'onde de Rayleigh du matériau à porosité nulle, b_R est un paramètre empirique.

III-10-Corrélation entre la vitesse de propagation des ondes et les modules d'élasticité

Il est établi que la densité ainsi que les modules d'élasticité sont reliés aux vitesses des ultrasons et d'un autre côté, selon le mode d'acquisition, il est possible de mesurer la vitesse des ondes de compression et de cisaillement.

La connaissance de ces vitesses nous permet de suivre l'évolution du module de Young dynamique (E_d), et de module de Poisson dynamique (ν_d), grâce aux relations suivantes [29]:

$$E_d = \frac{\rho \cdot V_t^2 (3V_l^2 - 4V_t^2)}{V_l^2 - V_t^2} \quad \text{[III-12]}$$

$$\nu_d = \frac{V_l^2 - 2V_t^2}{2(V_l^2 - V_t^2)} \quad \text{[III-13]}$$

V_l : vitesse de propagation de l'onde de compression (m.s^{-1})

V_t : vitesse de propagation de l'onde de cisaillement (m.s^{-1})

ρ : masse volumique (kg.m^{-3})

E_d : module d'élasticité dynamique (module de YOUNG) en Mpa.

ν_d : coefficient de Poisson.

Partie-B-

Les ondes ultrasonores.

La science du son est devenue un carrefour très animé à l'intersection de plusieurs disciplines et techniques, dont les applications sont très nombreuses appelées à se développer à l'avenir. L'acoustique fait des grands progrès dans les études, grâce au perfectionnement des instruments d'analyse du son [30].

L'acoustique est une branche de la physique qui étudie des sons et des ondes mécaniques, en faisant appel aux phénomènes ondulatoires, et à la mécanique vibratoire. L'acoustique a une notion très large, elle traite des domaines variés, tels que la propagation des ondes ultrasonores, l'acoustique des salles, le traitement du signal audio... [31].

On peut prendre en particulier le rôle de l'acoustique dans l'anatomie, ou plutôt la physiologie, l'oreille et l'ouïe, la psycho acoustique [32]. Les Grecques ont été les premiers à se servir des propriétés physiques du son, ils ont développé quelques connaissances qu'ils avaient sur les phénomènes d'absorption et de réfraction du son pour construire des amphithéâtres avec une forme particulière [31].

III-1-Contexte historique

Les premières études sur les phénomènes acoustiques remontent au **VI^e** siècle avant **J C**. En effet, les théoriciens et les philosophes anciens ont énoncé des hypothèses pertinentes au sujet de l'acoustique. **Sénèque**, par exemple, enseignait que c'est l'élasticité de l'air qui permet aux sons de se produire, et de se propager ; **Newton (1642-1727)**, donne la première tentative de calcul de la vitesse du son. Il se trompe, mais donne le début de la formalisation mathématique des phénomènes sonores ; et **C-Huygens** (vers **1690**) fait une synthèse des connaissances de l'époque sur les phénomènes sonores [33].

Le **XVIII^e** siècle est très riche concernant le développement de l'acoustique : **Alembert (1717-1783)**, **Euler (1707-1783)**, et **Lagrange (1736-1813)** établissent le formalisme définitif en développant la notion de dérivée partielle, puis en jetant les bases de la mécanique analytique. À partir de cette époque, le formalisme est établi, le reste n'est qu'un raffinement, **Helmholtz (1821-1894)** expérimente et développe la théorie de l'audition [34].

III-2-Ondes ultrasonores

- ✓ **Ultra** réfère à quelque chose d'extrême ou d'élevé ;
- ✓ **Son** réfère aux sons. Ce qui signifie que nous n'avons affaire à rien d'autre que des sons à haute fréquence.

De point de vue physique, une onde ultrasonore (onde acoustique) est un ébranlement de la matière (solide, liquide ou gaz) qui se caractérise par une variation de pression [35], en se propageant de proche en proche. C'est-à-dire un mode de propagation de l'énergie dans un milieu matériel sans transport de matière.

De point de vue physiologique, c'est un signal perçu par le sens de l'ouïe, se propage sous la forme d'une onde.

III-3-Caractéristiques des ondes ultrasonores

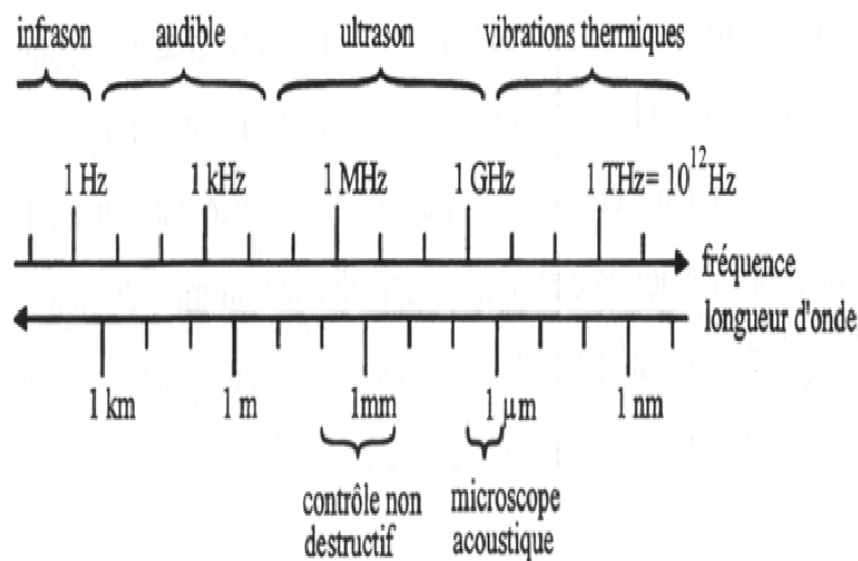


Figure-III-3- Échelle des ondes élastiques.

- ✓ Les ondes ultrasonores ont des fréquences au-delà des sons audibles par l'oreille humaine, et inférieures aux fréquences de vibration thermique des atomes (**20 kHz-1GHz**).
- ✓ Le milieu de propagation de l'onde ultrasonore est soumis à une succession de surpressions et de dépressions. Ces particules constitutives sont alors animées d'un mouvement de va- et vient dans l'axe de déplacement des ultrasons, de type sinusoïdal. Ce déplacement ne peut se faire dans le vide (à la différence des ondes électromagnétiques).
- ✓ Les ondes ultrasonores présentent toutes les propriétés générales des ondes élastiques [36].
- ✓ L'intérêt des ultrasons réside dans la petitesse de la longueur d'onde, elle est souvent de même ordre de grandeur que les dimensions caractéristiques des milieux qu'ils parcourent (diamètre des grains, hétérogénéités, défauts éventuels), ce qui leur permet de traverser facilement les matériaux solides et les fluides.
- ✓ Plus la fréquence des ondes ultrasonores est élevée, plus la directivité des faisceaux ultrasonores est grande, par contre. L'atténuation ultrasonore croît très vite avec la fréquence.

On voit que les ultrasons sont devenus un outil très commode et parfois irremplaçable pour étudier la matière et agir sur elle [37].

III-4-Appareil d'auscultation dynamique « Ultrason »

Figure-III-4- Appareil d'auscultation « Ultrason ».

L'appareil d'auscultation dynamique sur la figure (III-6) génère des impulsions ultrasonores qui sont en contact avec la zone à évaluer. Le temps de propagation à travers le béton est visualisé sur un afficheur digital.

III-4-1-Fonctionnement de l'appareil

Pour la mise en route de l'appareil, il faut :

- ✓ S'assurer que les piles sont bien mises en place ;
- ✓ Connecter les deux transducteurs, qui peuvent être indifféremment émetteur et récepteur, avec deux câbles ;
- ✓ Mettre l'appareil en route à l'aide de l'interrupteur.

L'appareil est maintenant prêt à l'essai, étant étalonné, le taux d'impulsion est de une par seconde.

- ✓ Choisir la surface à tester, de préférence lisse et sans crevasses ;
- ✓ Étendre une fine couche de produit couplant sur chaque transducteur ;
- ✓ Relever les valeurs affichées et répéter l'essai en d'autres places.

III-4-2-Positionnement des transducteurs

Les transducteurs ultrasoniques sont des accéléromètres, capables de convertir une énergie électrique en une énergie mécanique et inversement. Autrement dit, un transducteur peut fonctionner à la fois en émetteur et récepteur.

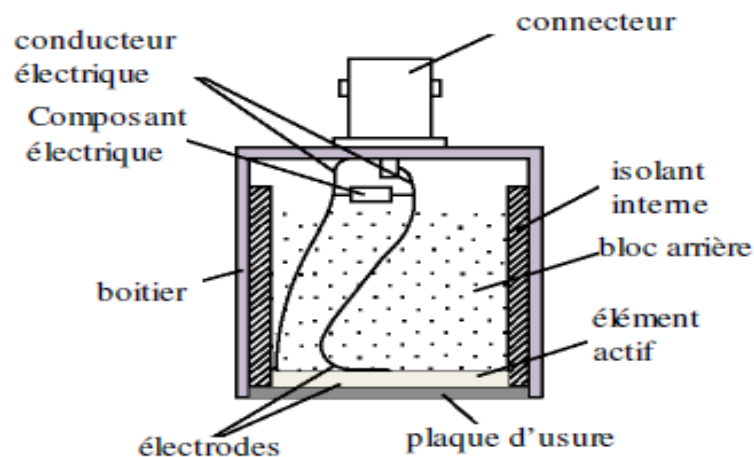


Figure-III-5-Transducteur ultrasonore.

Chaque agencement de position, appelé aussi mode, favorise la mesure d'un ou plusieurs types d'ondes (Figure III-8), tel que:

- ✓ Le mode d'acquisition **indirecte** est idéal pour la mesure d'ondes de surface ;
- ✓ Le mode d'acquisition **semi-directe** à des applications intéressantes pour la mesure d'ondes de cisaillement (onde transversale) ;
- ✓ Le mode d'acquisition **directe** est surtout utilisé pour mesurer les ondes de compression (onde longitudinale), c'est le mode pour lequel le maximum d'énergie est propagé ;
- ✓ Le mode **échographie** est idéal pour la mesure d'ondes rétrodiffusées. Il est à noter qu'en mode échographie, l'émetteur et le récepteur correspondent à un même capteur.

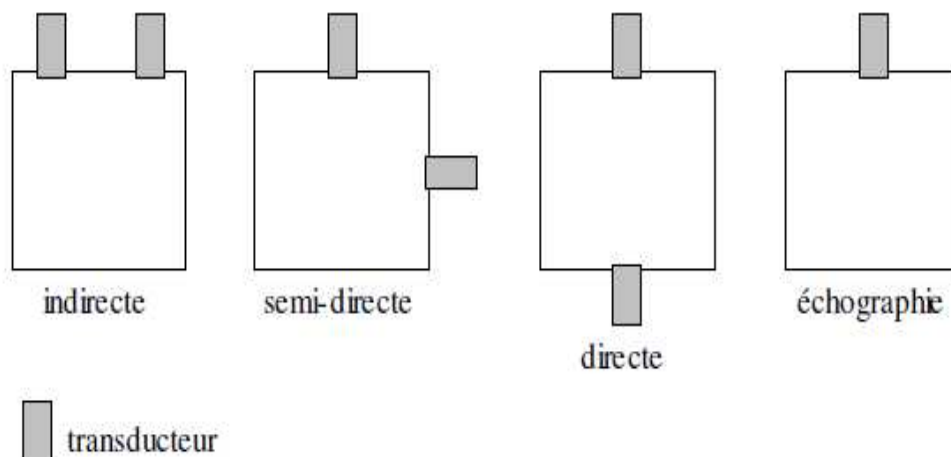


Figure-III-6-Modes d'acquisition.

III-4-3-Principe d'utilisation des ultrasons

- ✓ Un signal électrique est envoyé au transducteur ultrasonore, qui émet dans la structure à contrôler une onde élastique dont la propagation sera influencée par la présence d'éventuels défauts (fissures, inclusions...).
- ✓ Après avoir traversé la partie à contrôler, l'onde est détectée par un récepteur ultrasonore, souvent confondu à l'émetteur. Cette onde est alors convertie en signal électrique, que l'on peut mesurer facilement. Cette mesure et son interprétation doivent permettre de déduire la présence ou non des défauts, ainsi que leurs natures et leurs dimensions. Ce principe simple met en jeu des phénomènes physiques tels que la diffraction de la source, la réflexion / réfraction aux différentes interfaces, l'interaction de l'onde avec le défaut, qui peuvent rendre l'interprétation des mesures difficiles, a fortiori pour une analyse de dimensionnement.

III-5-Modes de propagation des ondes ultrasonores

L'onde ultrasonore a un comportement plus ou moins différent. Ce comportement est dû à l'interaction entre l'onde et la microstructure du matériau, autrement dit l'anisotropie est due aux structures internes du matériau qui présentent une certaine orientation. Dans un solide, deux modes de propagation sont possibles:

- ✓ Le premier est un mode longitudinal (ou de compression), les particules du milieu se déplacent parallèlement à la direction de propagation, C'est le cas par exemple d'une onde de pression se propageant dans une colonne de gaz. Le champ de déplacement des ondes longitudinales est décrit d'après Bedford et Drumheller 1996 [29], [38] par :

$$\begin{cases} U_1 = U_1(x, t) \\ U_2 = 0 \\ U_3 = 0 \end{cases} \quad \text{[III-14]}$$

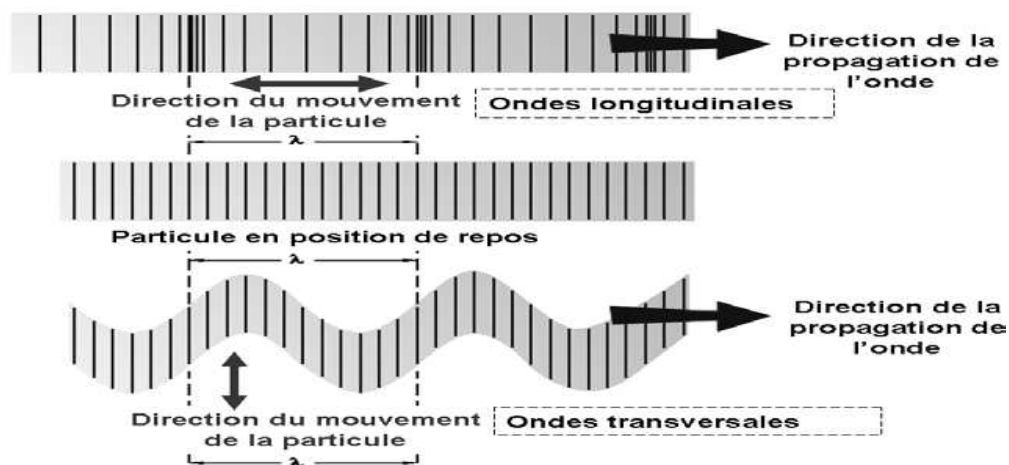


Figure III-7-Mode de propagation des ondes ultrasonores.

- ✓ Pour le deuxième mode, dit transversal ou de cisaillement, les particules du milieu vibrent suivant l'axe perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, C'est le cas par exemple d'une onde se propageant le long d'une corde : la perturbation (déformation de la corde) se propage horizontalement le long de la corde alors que la déformation (mouvement des points de la corde de bas en haut puis de haut en bas au passage de la perturbation) est verticale, ce type d'onde ne se propage que dans les solides [29], [38], Le champ de déplacement est donné par :

$$\begin{cases} U_1 = 0 \\ U_2 = 0 \\ U_3 = U_3(x, t) \end{cases} \quad \text{[III-15]}$$

III-6-Paramètres de l'onde ultrasonore

L'étude de la propagation des ondes ultrasonores fait intervenir les lois physiques de transfert de l'énergie mécanique, ainsi de la mécanique des fluides.

Il apparaît que la propagation de l'onde dépend fortement des propriétés mécaniques du matériau traversé, et pour la caractériser, plusieurs paramètres sont nécessaires.

III-6-1-Période (T) et fréquence (f)

La période représente la durée d'un cycle complet de variation. C'est le temps qui sépare le passage par deux maxima consécutifs, l'unité est la seconde. L'information totale véhiculée pendant tout le temps du signal constitue en général un train d'ondes.

La fréquence (f) est l'inverse de la période tel que :

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{[I-16]}$$

Elle s'exprime en Hertz c'est-à-dire le nombre d'oscillation par seconde. Les ondes sonores audibles par l'homme ont une fréquence de **20 Hz** à **20.10³ Hz**. Plus la fréquence est grande, plus le son est aigu.

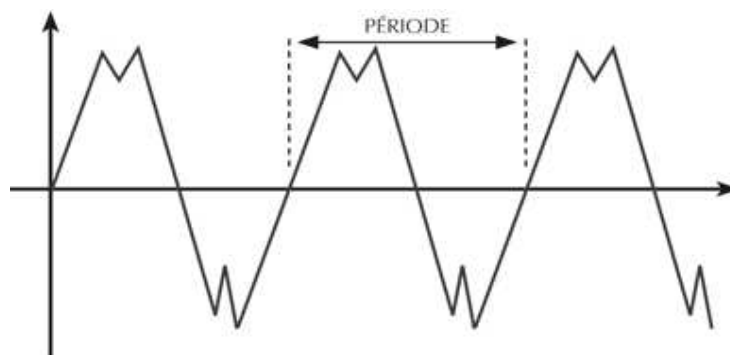


Figure-III-8-Période d'une onde sonore.

III-6-2-Pulsation (ω)

On appelle pulsation du signal pur, le terme (ω) tel que :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad [\text{III-17}]$$

Elle s'exprime (rad/s).

III-6-3-Nombre d'onde (k)

C'est une grandeur qui caractérise la progression de l'onde acoustique. Le facteur d'onde est défini par :

$$K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad [\text{III-18}]$$

III-6-4-La vitesse de propagation

La vitesse C d'une onde est appelée **célérité**. Elle s'exprime en mètre par seconde. Elle dépend de la nature de l'onde, et des caractéristiques physiques du milieu où elle se propage. Elle est définie de la manière suivante :

$$C = \frac{\omega}{k} \quad [\text{III-19}]$$

Avec: (ω) : la pulsation de l'onde (en rad / s) ; (k) : le nombre d'onde.

La vitesse du son étant constante dans un milieu matériel homogène, plus la fréquence augmente, plus la longueur d'onde diminue.

Le son se déplace à (**340 m/s**) dans l'air (**1 224 Km/h**), (**1 500 m/s**) dans l'eau, (**6000 m/s**) dans le granite. Plus le milieu est dense, plus cette vitesse est grande. Dans les milieux solides le son peut se propager encore plus rapidement.

Le son ne se propage pas dans le vide, car il n'y a pas de matière pour supporter les ondes produites.

III-6-5-Longueur d'onde (λ)

La longueur d'onde λ est la distance entre deux maxima successifs à un instant donné. Durant chaque période T , l'onde s'est donc propagée sur une distance λ proportionnelle au temps T et à la vitesse de propagation (C) tel que :

$$\lambda = CT = \frac{C}{f} \quad [\text{III-20}]$$

C : vitesse du son dans le milieu en (m.s⁻¹) ;

T : la période en (s) ;

f : la fréquence d'émission en (Hz).

III-6-6-Espace-temps

Comme tous les phénomènes perçus, le temps joue un rôle fondamental pour l'acoustique. Il existe même des relations très étroites entre l'espace et le temps, vu que le son est une onde qui se propage dans l'espace au cours du temps [31]. On distingue trois grandes classes de signaux acoustiques :

- ✓ **Périodiques** : dont la forme se répète à l'identique dans le temps ;
- ✓ **Aléatoires** : qui n'ont pas de caractéristiques périodiques ;
- ✓ **Impulsionnels** : qui ne se répètent pas dans le temps et ont une forme déterminée.

III-7-Notions élémentaires utilisées dans l'acoustique

III-7-1-Impédance acoustique

L'impédance d'un milieu (solide, liquide ou gazeux) indique la quantité de pression acoustique qui est générée par la vibration des molécules d'un milieu acoustique particulier à une fréquence donnée.

Elle est définie comme le rapport de la pression acoustique sur la vitesse de propagation d'une onde. Il s'agit d'une grandeur physique qui représente en fait la résistance acoustique de milieu à la propagation de l'onde acoustique. La notion d'impédance se révèle être d'un grand intérêt en acoustique, elle permet de remplacer les calculs acoustiques par des calculs analogues électriques tel que [39] :

- ✓ L'équivalent électrique de la pression acoustique est la tension électrique.
- ✓ Le courant électrique est l'équivalent de la vitesse de déplacement de l'onde et leur rapport est bien la résistance électrique.

$$Z = \frac{\rho}{c} \quad \text{[III-21]}$$

ρ : étant exprimé en (kg/m³) ; C : en (m/s) ; Z : est exprimé en (Pa.s/m).

III-7-2-Intensité acoustique

En chaque point, la pression acoustique (P) varie selon la fréquence de l'onde ultrasonore. L'énergie délivrée dans le milieu dépend des variations de pression qui soumettent les particules du milieu à des mouvements vibratoires.

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

$$I = \frac{P^2}{2 \rho \cdot C} \quad \text{[III-22]}$$

I : l'intensité s'exprime en (W/cm²) ; P : pression acoustique (kg.m⁻¹.s⁻²) ;
 ρ : masse volumique (kg.m⁻³) ; et C : célérité du son en (m.s⁻¹).

III-7-3-Puissance acoustique

La puissance acoustique est définie par le produit d'amplitudes de la pression acoustique et la vitesse acoustique en tout point d'un front d'onde, elle est donnée par la relation suivante [40]

$$W = p_e \cdot V_e \cdot S \quad \text{[III-23]}$$

P_e : la pression efficace en $(\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2})$; V_e : la vitesse efficace en (m.s^{-1}) ;

S : surface du front d'onde en (m^2) et la puissance est exprimée en Watt.

III-8-Interaction des ondes ultrasonores avec la matière

La propagation d'une onde ultrasonore est fortement dépendante de la nature du milieu dans lequel elle se propage. Lorsqu'elle change de milieu ou qu'elle rencontre des obstacles, elle dévie la trajectoire.

Dans un milieu homogène, les ondes ultrasonores se propagent de manière rectiligne. La vitesse de propagation C (vitesse du son) dépend du milieu traversé (densité, modules élastiques) et des dimensions géométriques.

Pour une onde, un obstacle consiste en un milieu dans lequel les propriétés physiques de propagation sont différentes.

III-8-1-Interface

Une interface acoustique est définie comme étant la surface de séparation entre deux milieux d'impédances acoustiques Z différentes.

III-8-2-Émission et réception de l'onde ultrasonore

L'émission d'impulsions ultrasonores dans un solide produit deux effets :

- ✓ Un effet thermique qui dépend de la puissance acoustique de l'onde et qui engendre une propagation de la chaleur dans le milieu.
- ✓ Un effet mécanique qui est la transmission, la réflexion, et la dispersion.

III-8-3-La transmission

Lorsqu'une onde passe d'un milieu à un autre à travers une interface, une partie de l'énergie incidente est transmise et l'autre est réfléchi au niveau de l'interface séparant les deux milieux. La transmission est liée directement aux impédances des milieux traversés.

$$\frac{I_{transmis}}{I_{incident}} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad \text{[III-24]}$$

III-8-4-La réflexion

Lorsqu'une énergie, comme le son, se propage à travers une interface séparant deux milieux de caractéristiques acoustiques différentes, une partie de l'énergie passe, en général, dans le deuxième milieu et une autre partie réfléchi, (figure III-11).

Le faisceau réfléchi repart avec un angle identique à l'angle d'incidence

$$\theta_{réfléchi} = \theta_{incident} \quad [III-25]$$

La reflexion est aussi liés au impédances des milieux traversés

$$\frac{I_{réfléchi}}{I_{incident}} = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad [III-26]$$

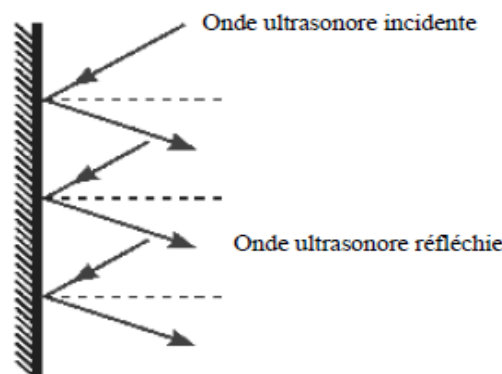


Figure-III-9- Réflexion des ondes ultrasonores.

III-8-5-La réfraction

La réfraction, en physique des ondes est le phénomène de déviation d'une onde lorsque sa vitesse change entre l'interface de deux milieux, (figure III-12). Le faisceau transmit ne conserve pas sa direction initiale que dans le cas où il est perpendiculaire à l'interface, dans tous les autres cas, il est dévié partiellement ce qu'on l'appelle la réfraction.

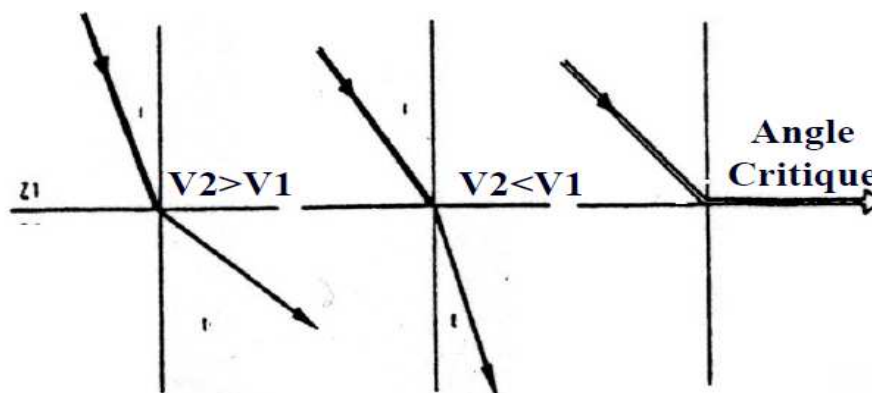


Figure-III-10- Réfraction des ondes ultrasonores.

III-8-6-La diffusion

La diffusion correspond à la réémission dans toutes les directions d'une fraction minime de l'énergie de l'onde ultrasonore. On dit que l'onde est diffusée : c'est-à-dire réfléchi dans toutes les directions, il est possible de définir trois types de diffusion [31]:

- ✓ Interface $\gg$ longueur d'onde: Rétrodiffusion (diffusion directionnelle), cas -A- ;
- ✓ Interface = longueur d'onde : Diffusion intégrale (diffusion antérieure et postérieure) cas -B- ;
- ✓ Interface $\ll$ longueur d'onde : Diffusion multidirectionnelle (diffusion omnidirectionnelle), cas -C-

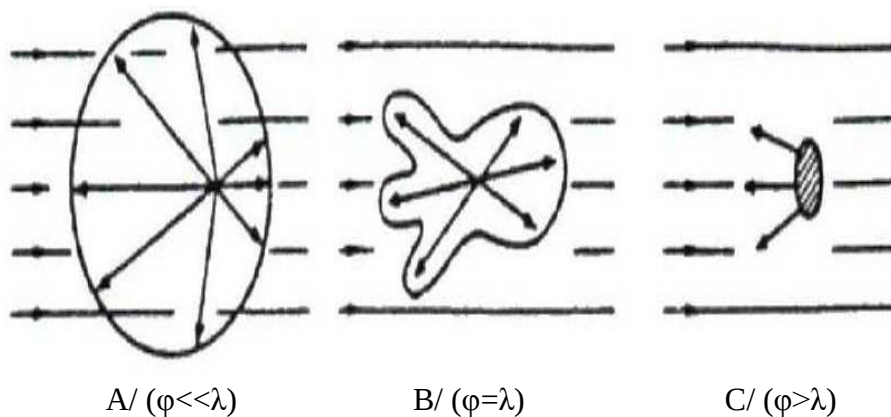


Figure -III-11- Diffusion des ondes ultrasonores.

III-9-Description d'un faisceau ultrasonore émis

Le faisceau ultrasonore émis par un transducteur (source plane) selon la théorie de la diffraction pour un rayon (r) répondant à la condition ($r > \lambda$) est constitué d'un lobe principal formant un cône dans lequel la plus grande partie de l'énergie est concentrée, et d'un lobe secondaire d'énergie beaucoup plus faible (Figure III-14).

La géométrie du faisceau dépend de la distance à laquelle se trouve la source, ainsi que de sa forme : il est possible de définir deux zones différentes.

III-9-1-La zone de FRESNEL (champ proche)

La première zone appelée **zone de Fresnel** (ou champ proche) où le faisceau est quasiment cylindrique. Pour une source circulaire d'un diamètre (D), toute l'énergie est concentrée dans une zone cylindrique d'un diamètre (d_1), la longueur de cette zone est donnée par :

$$l = \frac{D^2}{4c} f \quad \text{[III-27]}$$

d : diamètre de la zone en (m), l : longueur de la zone en (m) ; D : diamètre de la source en (m) ; C : célérité en (m.s^{-1}) ; f : fréquence en (Hz).

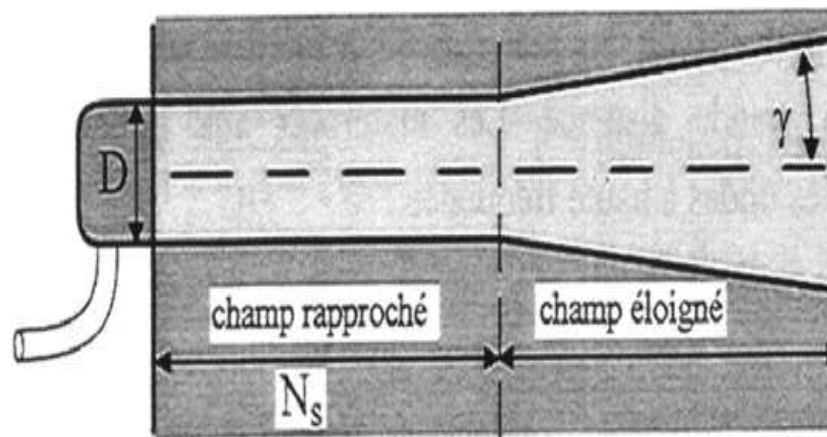


Figure-III-12-Champ rapproché, champ éloigné de l'onde ultrasonique.

III-9-2-La zone de FRAUNHOFER (champ éloigné)

La seconde zone est zone de **Fraunhofer** (ou champ lointain) d'une géométrie conique, elle se trouve d'une distance de zone supérieure à (r^2/λ) par rapport à la source. Elle se caractérise par une divergence du faisceau selon un angle de divergence (θ) qui est constant par rapport à l'axe central. Cette divergence est inversement proportionnelle à la fréquence et au diamètre de la source.

$$\sin \theta = \frac{1,22 C}{D f} \quad [\text{III-28}]$$

θ : angle de divergence en degrés ; D : diamètre de la source en (m) ;

C : célérité en (m.s^{-1}) ; f : fréquence ultrasonore en (Hz).

Le front d'onde est convexe dans cette zone et il y a diminution rapide de l'intensité car la surface sur laquelle elle se répartit augmente.

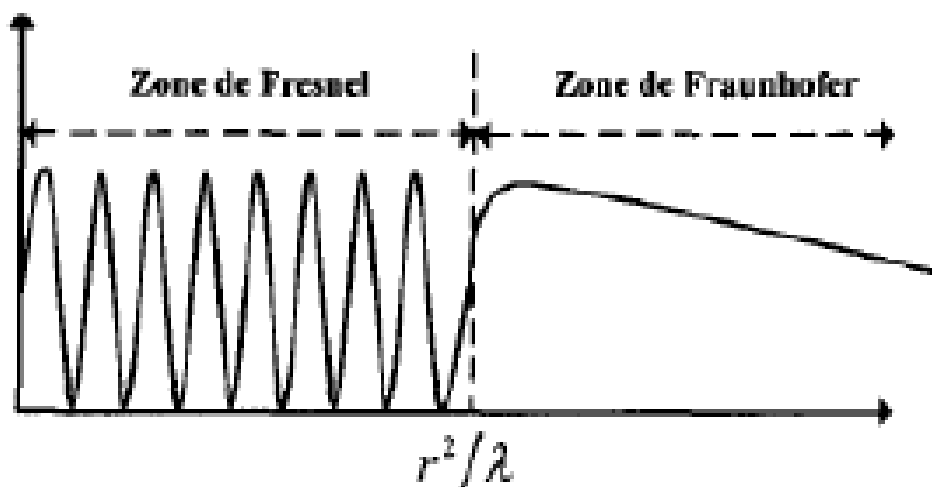


Figure -III-13-Représentation du champ de Fraunhofer.

III-10-Atténuation d'une onde ultrasonore

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 un baissement d'énergie de signal le long de son trajet dans le milieu atténuant, ce qui entraîne une diminution de l'amplitude des ondes.

L'atténuation est causée par trois phénomènes : la diffusion, la dispersion et la dissipation.

- ✓ **La diffusion** : est un phénomène donnant naissance à des ondes diffusées qui répartissent de façon continue et aléatoire l'énergie de l'onde incidente dans toutes les directions. Dans le cas du béton, elle est principalement attribuée aux multiples diffractions de l'onde sur les défauts (microstructure, répartition des granulats).
- ✓ **La dispersion** : correspond à la décomposition d'une onde causée par la variation des propriétés physiques du milieu de propagation (par exemple la vitesse), en fonction de la fréquence.
- ✓ **La dissipation** : se traduit par la transformation d'énergie rayonnante en une autre forme d'énergie par interaction avec la matière.

CHAPITRE-IV-
PARTIE
EXPÉRIMENTALE.

Programme expérimental -I-

**Utilisation des ondes
ultrasonores pour la
caractérisation de
profondeur des fissures
dans les éléments en
béton.**

L'étude des pathologies des matériaux (fissures) par les méthodes non destructives, en particulier la méthode ultrasonore, est sensible aux paramètres environnementaux et aux propriétés mécaniques des matériaux. Elle ne peut se faire sans étude préalable des matériaux en question, depuis l'élaboration jusqu'au comportement mécanique du produit fini.

Ce chapitre a pour but de présenter les travaux expérimentaux qui ont été exécutés lors de ce travail, et pour cela, on a réparti ces travaux en deux parties :

- ✓ La première partie a été consacrée pour la confection des éprouvettes de béton objet de cette étude, sur lesquelles on réalise des fissures artificielles, puis à travers des essais ultrasonores, on estime leurs profondeurs, on évalue l'effet de la profondeur des fissures sur la résistance mécanique de béton en utilisant l'essai de la compression mécanique.
- ✓ En deuxième partie, après avoir choisi une méthode de réparation de béton parmi les autres méthodes existantes, on rénove les éprouvettes fissurées en utilisant l'injection de béton fissuré, on exerce des différents tests (des essais ultrasonores, écrasement des éprouvettes) afin d'établir l'efficacité de cette méthode.

-PROGRAMME EXPERIMENTAL I-

UTILISATION DES ONDES ULTRASONORES POUR LA CARACTERISATION DE PROFONDEURS DES FISSURES DANS LES ELEMENTS EN BETON.

Cette première partie expérimentale permet en première position de mettre la capacité des ondes ultrasonores (les ultrasons) en épreuve pratique à l'égard de la caractérisation de profondeur des fissures des éléments en béton, il s'agit de détecter, d'identifier, et de caractériser la profondeur de ces fissures dans les brefs délais.

Souvent l'apparition des fissures est inévitable, elles infectent le côté esthétique de la structure de point de vue générale, mais plus majeure, elle diminue la durée de vie des structures du fait qu'elle touche à la résistance de la structure: quel est l'impact de la profondeur des fissures sur la résistance de béton?.

Et donc pour parvenir à concrétiser les buts de cette recherche, on doit fixer:

- ✓ L'approche ultrasonore à suivre pour la caractérisation de profondeur des fissures ;
- ✓ Les matériaux sur lesquels nous avons travaillé (compositions, caractéristiques mécaniques) ;
- ✓ Les dispositifs utilisés ;
- ✓ Le mode opératoire pour la confection et la fissuration des éprouvettes ;
- ✓ L'utilisation d'une méthode destructive (carottage), afin de faire un rapprochement entre la résistance à la compression de béton fissuré et le béton de témoignage.

IV-1- Élaboration de béton objet de cette étude

Trois mélanges de béton ont été confectionnés à base des mêmes matériaux :

- ✓ Béton courant dont le diamètre maximal des granulats ne dépasse pas 25mm ($D_{\max}=25\text{mm}$), nommé **B₂₅** ;
- ✓ Béton courant dont le diamètre maximal des granulats ne dépasse pas 15mm ($D_{\max}=15\text{mm}$), nommé **B₁₅** ;
- ✓ Un mortier à base de sable et de ciment, nommé **M**.

Cet échantillonnage de béton est fondé principalement sur quelques idées qui s'explicitent en:

- ✓ Prouver l'aboutissement des résultats des essais ultrasonores sur plusieurs variétés de béton.
- ✓ posséder un concept général sur l'évolution des caractéristiques ultrasonores selon la granulométrie de béton.
- ✓ Explorer les effets de la granulométrie sur la résistance du béton.

IV-2-Présentation des matériaux

La connaissance des caractéristiques des matériaux est obligatoire et nécessaire pour toute recherche sur les bétons, puisque chacune peut influencer sur les résultats d'étude.

Les résultats des essais physiques sur les différents types d'agréats ont fourni les résultats suivants :

IV-2-1-Sable

Sable noir prévenant d'oued Sli (Chlef), dont le diamètre maximal $D_{\max}=3\text{ mm}$, ayant les caractéristiques suivantes :

Module de finesse (M_f)	2,07
Masse volumique absolue	2660 (Kg/m^3)
Masse volumique apparente	1520 (Kg/m^3)
Absorption d'eau	0,64%
Teneur en eau	6,43%

Tableau IV-1- Caractéristiques physico-chimiques du sable.

- ✓ Selon la norme « **NF P 18-560** », on a : ($1.8 \leq M_f \leq 2.2$), le sable d'oued Sli est un sable fin, donc on ne fait pas appel à une correction.

IV-2-2-Les graviers

Les agrégats concassés de différentes dimensions (3/8, 8/15, 15/25) livrés par la carrière de BOUZEGZA sise à Quedara.

Agrégats	Masse volumique apparente (Kg/m ³)	Masse volumique absolue (Kg/m ³)
Gravier (3/8)	1520	2660
Gravier (8/15)	1420	2650
Gravier (15/25)	1460	2660

Tableau-IV-2- Caractéristiques physiques des agrégats.

IV-2-3-Ciment

Le ciment utilisé est un Ciment "CPJ", de classe de résistance 42,5 MPa provient de la cimenterie de « M'sila ACC ».Il est caractérisé par :

Essais	02 Jours	07 Jours	28 Jours
Résistance à la compression (MPa)	20.37	40.10	52.16
Résistance à la flexion (MPa)	5.646	9.878	13.988

Tableau-IV-3-Essais mécaniques sur le ciment.

IV-2-4-Adjuvant

L'adjuvant utilisé est un super plastifiant -haut réducteur d'eau commercialisé sous le nom de "VISCOCRETE TEMPO 12", fabriqué par SIKA, sa plage d'utilisation est fixée par la fiche technique conforme à la norme «NF EN 934-2 ».

IV-2-4-1-Dosage

La plage de dosage est déterminée sur chantier en fonction de type du béton et des effets recherchés. Alors que la plage de dosage recommandée est de 0.2 à 3.0 % du poids de ciment.

IV-2-4-2-Les caractéristiques

Forme	Liquide
Couleur	Brun clair
PH	6.0±1
Densité	1.06±0.01
Teneur en Na ₂ O _{éq}	<1%
Extrait sec	30.2±1.3

Tableau-IV-4-Caractéristiques de l'adjuvant.

IV-2-5-L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est une eau potable de la commune de Rouïba.

IV-3-Formulation des bétons

La méthode utilisée pour formuler les bétons est celle de Dreux Gorisse, qui repose sur l'utilisation des courbes granulaires de référence, permettant d'approcher par le calcul ou par la construction géométrique.

IV-3-1-Formulation de béton courant B₂₅

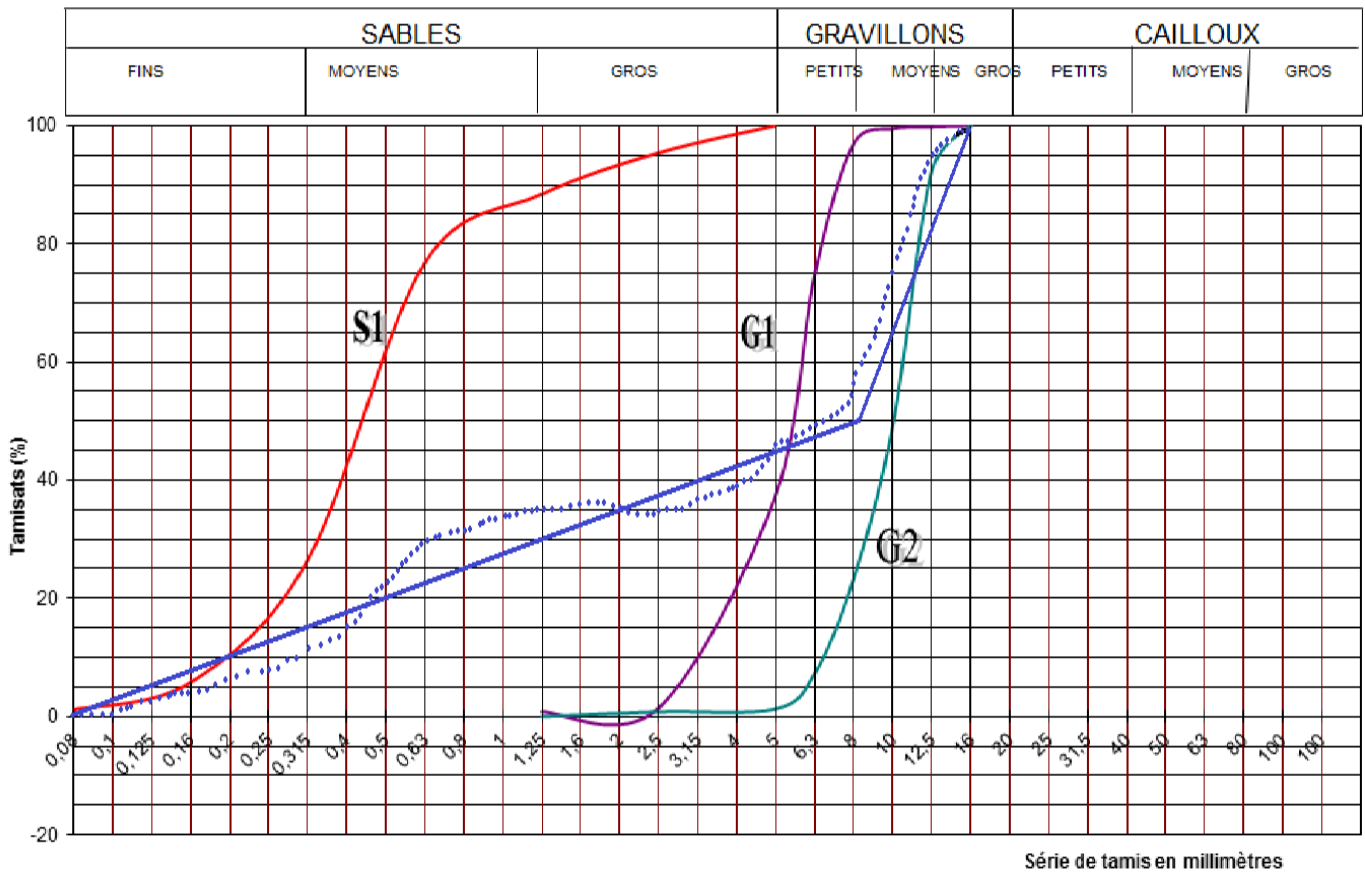


Figure-IV-1-Courbe granulométrique du béton B₂₅.

La composition du béton B₂₅ est donnée dans le tableau suivant :

Agrégats	% des agrégats	Composition pondérale (kg /m ³)	Composition volumique (L)
Sable noir	36	656	426
Gravier (3/8)	8	148	97
Gravier (8/15)	13	240	169
Gravier (15/25)	43	796	545
Ciment	/	400	400
Eau	/	172	172
Adjuvant	/	4.8	4.52

Tableau-IV-5- Proportions optimales de mélange de béton B₂₅.

IV-3-2-Formulation de béton courant B₁₅Figure-IV-2- Courbe granulométrique du béton B₁₅.

La composition du béton B₂₅ est donnée dans le tableau suivant :

Agrégats	% des agrégats	Composition pondérale (kg /m ³)	Composition volumique (L)
Sable noir	39	701	455
Gravier (3/8)	10	182	120
Gravier (8/15)	51	927	653
Gravier (15/25)	/	129	129
Ciment	/	180	180
Eau	/	4.8	4.52
Adjuvant	1.2	701	455

Tableau-IV-6- Proportions optimales de mélange de béton B₁₅.

IV-3-3-Mortier

Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (ciment ou chaux) à du sable, de l'eau et éventuellement un adjuvant ; il se distingue de béton par l'absence des gravillons.

La préparation du mortier exige les proportions illustrées dans le tableau ci-dessous.

Agrégats	% des agrégats	Composition pondérale (kg /m ³)	Composition volumique (L)
Sable noir	75	1350	875
Ciment	25	450	290
Eau	/	180	180
Adjuvant	/	4.8	4.52

Tableau-IV-7- Proportions optimales d'un mortier –M-.

IV-4-Les équipements requis au fil des essais

Comme matériels et équipements nécessaires, on trouve:

- ✓ **Malaxeur** : le malaxeur utilisé à une capacité de 30l.
- ✓ **Moulage** : selon la géométrie des éprouvettes à confectionner, on a choisi des moules parallélépipèdes en bois de dimensions (550x25x25) cm³. Les moules sont bien lavés puis huilés pour faciliter le décoffrage.
- ✓ **L'appareil de Vicat** : l'appareil de Vicat est un appareil qu'est régi par la norme « NF- EN 196-3 de 1995 ». Il a pour objet de définir le temps de début et de fin de prise à travers des tests de résistance à la pénétration d'une aiguille normalisée qui se caractérise par (S=1mm², masse=300grammes).
- ✓ **Plaques métalliques** : afin de créer les fissures artificielles, on a fait appel à des feuilles métalliques minces en acier de dimensions (17x10) cm², dont l'épaisseur est de (1mm).
- ✓ **Appareil ultrasonique** : c'est l'élément le plus important lors de ces travaux, un ultrason de Controlab, Type E0632, facile à porter sur chantier et manœuvrable dans les différentes situations et les différentes zones des travaux.
- ✓ **Appareil de Carottage** : afin d'assurer l'extraction de carottes de béton durci, elle contient un carottier normalisé de section de (5.2cm²).
- ✓ **Appareil de compression** : elle est utilisée pour déterminer la résistance à la compression des carottes prélevées de béton témoin et de béton fissuré.

IV-5-Procédure de confection des éprouvettes**IV-5-1-Test de Vicat**

Avant d'amorcer la confection des éprouvettes, ou de créer les fissures artificielles dans le béton. Il est indispensable d'évaluer le temps de prise de béton, dans le but est de posséder un concept général sur la plage de temps pour laquelle on peut retirer les feuilles métalliques du béton.

Selon Vicat, le temps de début de prise est atteint lorsque la profondeur d'enfoncement de l'aiguille dans l'échantillon est de $(4 \pm 1 \text{ mm})$, et la fin de prise correspond à un enfoncement de (0.5 mm) .

On prépare une pâte de ciment dont les proportions sont :

$$M_c = 500\text{g} \quad \text{et} \quad M_w = (M_c/4) = 125\text{g}$$

Tel que : M_c : la masse de ciment ; M_w : la masse de l'eau.



Figure IV-3- Essai de prise de ciment.

Le tableau ci-dessus donne le temps de début de prise et celui-ci de la fin de prise du ciment utilisé

Article	Temps
Début de prise	02 ^h :08 ^{min}
Fin de prise	05 ^h :33 ^{min}

Tableau-IV-8- Temps de prise de ciment.

IV-5-2-Confection et protocole de fissuration des éprouvettes

- ✓ Le malaxage et la mise en place des bétons s'effectuent avec les outils classiques du laboratoire de génie civil.
- ✓ Selon le type de béton à élaborer, les éléments constitutifs ont été mélangés dans le malaxeur, dans l'ordre suivant : gravier (15/25, 8/15, 3/8), sable, ciment, eau et adjuvant.
- ✓ Trois séries des éprouvettes de trois types de bétons (B₂₅ ; B₁₅ ; M) de géométrie identique (55x25x25) cm³ sont confectionnées.
- ✓ Chaque série comprend quatre éprouvettes fissurées artificiellement à différentes profondeurs (deux éprouvettes entaillées d'une profondeur $h_1=10\text{cm}$, deux éprouvettes entaillées d'une profondeur $h_2=5\text{cm}$), et une éprouvette témoin.
- ✓ Lors de gâchage de béton frais dans les éprouvettes, et à mi- largeur de chaque éprouvette, on dépose une plaque métallique huilée verticalement pour créer une fissure (une entaille) dans le béton d'une profondeur $h_1=10\text{cm}$ à partir de la surface supérieure libre de l'éprouvette.
- ✓ Après la mise en place de la plaque, la surface libre de l'éprouvette est bien lissée et unie, afin d'avoir une surface lisse et douce sans aspérités et sans rugosité.
- ✓ La même procédure qui a été mise en œuvre pour réaliser une fissure d'une profondeur $h_2=5\text{cm}$.
- ✓ Après le façonnage des éprouvettes fissurées, on confectionne les éprouvettes témoins.
- ✓ Cette procédure représente le mode le plus élémentaire pour élaborer des fissures artificielles dans le béton, et c'est le même cheminement employé dans chaque série d'éprouvettes de béton.
- ✓ A la fin, on dépose les éprouvettes dans les conditions ambiantes ($T=27\text{ }^{\circ}\text{C}$), en attendant le début de prise de ciment.

- ✓ Au-delà du temps de début de prise, et avant le rapprochement de temps de la fin de prise. On ôte soigneusement les feuilles métalliques des éprouvettes fissurées. on obtient des éprouvettes fissurées artificiellement avec des profondeurs différentes.
- ✓ Après la prise, les échantillons ont été placés durant 24 heures à l'air libre puis décoffrés.



Figure IV-4- Confection des éprouvettes et création des fissures artificielles dans les bétons. (B₂₅, B₁₅, M).

- ✓ Les éprouvettes de béton sont conservées dans un endroit à température ordinaire ($T=25^{\circ}\text{C}$).
- ✓ Après le durcissement de béton, et comme repère de démarrage des essais, on choisit le septième jour (07 jours). Des transducteurs de l'appareil d'ultrason sont placés systématiquement centrés par rapport au point d'ouverture de la fissure, au contact avec la surface supérieure de chaque éprouvette, de part et d'autre de la fissure, sur un parcours de ($X_1=16\text{cm}$), et de ($X_2= 32\text{cm}$), respectivement pour avoir le (T_1) et (T_2).
- ✓ On maintient les longueurs de parcours fixe au cours de ce travail, ce qui nous permet de caractériser la profondeur de chaque fissure au cours de temps, à la faveur de la relation [II-2].
- ✓ Pour des résultats plus adéquats et conformistes, chaque mesure est répétée 06 fois, en ôtant puis on repositionnant les capteurs.



Figure-IV-5-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures dans les éléments en béton.

Afin d'estimer l'influence de profondeurs des fissures (h_1 , h_2) sur la résistance mécanique à la compression des différents bétons respectivement (témoins, fissurés), on a fait un recours aux essais destructifs, sous forme de "carottage".

IV-6-Evaluation de la résistance de béton (fissuré et témoin)

Selon la norme « **EN-12504** », le carottage est une investigation destructive dans les structures en béton armé, peut prendre plusieurs formes :

- ✓ Soit on y a recours pour effectuer un prélèvement de matériau pour connaître ses caractéristiques géométriques mécaniques et chimiques ;
- ✓ Soit c'est pour avoir accès à des éléments internes ou sous-jacent à la structure ;
- ✓ Cela permet aussi de connaître l'état d'altération en profondeur ainsi que l'ampleur des pathologies.

IV-6-1-Mode opératoire d'un prélèvement de béton par carottage

Avant d'entamer l'opération de carottage, on a préparé les éprouvettes de telle sorte :

- ✓ Une éprouvette dont la profondeur de fissure est $h_1=10\text{cm}$;
- ✓ Une autre éprouvette d'une profondeur de fissure $h_2=5\text{cm}$;

- ✓ L'éprouvette témoin.
- ✓ L'appareil de carottage mené d'un carottier d'une section de $(5.2) \text{ cm}^2$.

Dans le but est de réaliser un bon carottage dans les éléments en béton, il faut réunir tous les moyens nécessaires pour la réussite de l'opération (les moyens sécuritaires, les appareillages...).

- ✓ L'extraction doit être réalisée perpendiculairement à la surface, de sorte que les carottes ne subissent aucune dégradation. Le carottier doit être fermement tenu en place pendant la durée de l'opération.
- ✓ Immédiatement après l'extraction, on marque les carottes sans ambiguïté et de façon indélébile le type de béton pour lequel on a procédé à l'extraction de la carotte.
- ✓ Après l'extraction, on coupe les carottes pour avoir les dimensions normalisées d'une carotte d'une section de $(5.2 \times 10.4) \text{ cm}^2$.
- ✓ on traite les deux extrémités des carottes destinées à subir l'essai de compression par un surfacage au soufre conformément aux prescriptions de l'annexe « A » du « **PR-EN 12390-3:1999** ».



**Figure-IV-6-Réalisation de carottage des différentes éprouvettes.
(Fissurées et témoins).**



Figure-IV-7- Surfaçage des carottes normalisées.

IV-6-2-Essais de compression

Un essai d'écrasement est effectué en utilisant un appareil de compression conformément au « **PR-EN 12390-3:1999** », on doit :

- ✓ Inspecter visuellement la géométrie des carottes, et assurer que le surfaçage des extrémités n'est pas fissuré.
- ✓ Éliminer toute trace de sable ou d'autre matériau et toute trace d'eau superficielle (l'état d'humidité) de la surface de l'éprouvette.
- ✓ Ajuster la carotte dans la bonne position dans l'appareil de compression jusqu'à la rupture.



Figure-IV-8- Ecrasement des carottes.

Programme expérimental -II-

La réparation des fissures.

Vu le risque et le danger que la profondeur des fissures présente sur les structures, on doit mettre au point des solutions pour modérer les effets indésirables des fissures sur les structures, et donner aux structures une nouvelle allure de rénovation et d'entretien.

Le processus de réparation et de traitement des fissures représente la meilleure solution et le premier choix a exécuté pour restaurer les structures dégradées.

-PROGRAMME EXPERIMENTAL II-

REPARATION DES FISSURES.

Cette étude entre dans la deuxième phase de ce projet, et les principaux objectifs sont:

- ✓ Utiliser des méthodes abordables sur chantier afin de traiter les fissures par injection pour obtenir des résultats représentatifs ;
- ✓ Tester les produits les plus prometteurs ;
- ✓ Etudier les effets des injections sur les fissures ;
- ✓ Relever et évaluer l'efficacité de cette méthode de traitement à résoudre les problèmes de pathologie de béton.

IV-1-Matériels utilisés lors du traitement

- ✓ Tronçonneuse : pour l'ouverture des fissures ;
- ✓ Chignole : afin de créer des trous de forages dans les éprouvettes ;
- ✓ un agitateur : pour assurer le mélange des produits ;
- ✓ Couteau ;
- ✓ Des instruments de mesure ;
- ✓ Cavaliers d'injections ;
- ✓ Compresseur d'air ;
- ✓ Appareil de carottage.

IV-2-Produits utilisés lors de la réparation des fissures

Les produits utilisés lors de la réparation des fissures conformément aux normes « **AFNOR NFT36005-1** », sont délivrés par une entreprise locale "Granitex", destinés à la réparation des fissures dont la profondeur est importante.

IV-2-1- MEDAJOINT MASTIC

Le MEDAJOINT MASTIC est un mastic pour joints verticaux et horizontaux, à base de résine époxy sans solvant, fournit sous forme d'un kit pré dosé comprenant deux composants sous forme d'une pâte:

- ✓ Élément A: résine ;
- ✓ Élément B: durcisseur ;
- ✓ rapport pondéral (A/B) :.....(1/1).

C'est un produit qui se caractérise par :

- ✓ Ne coule pas ;
- ✓ Application et lissage facile ;
- ✓ Bonne adhérence et souplesse ;
- ✓ Très bonne résistance chimique.

IV-2-2-MEDAPOXY INJECT 812

Le MEDAPOXY INJECT 812 est une résine époxydique sans solvant pour injection des fissures dont la profondeur est importante, livré sous forme de kit pré dosé à deux composants :

- ✓ Élément A:..... Résine ;
- ✓ Élément B:..... Durcisseur ;
- ✓ rapport pondéral (A/B) :.....(1/2).

C'est un produit qui se caractérise par :

- ✓ Une excellente adhérence sur supports béton et mortier ;
- ✓ Sans retrait au durcissement ;
- ✓ Très bonne résistances mécaniques et chimiques.

IV-3-Les préliminaires de la réparation des fissures (préparation des supports)

Avant tout traitement des fissures par injection, les supports en béton fissurés nécessitent un traitement au préalable tel que:

- ✓ Elargir les lèvres de la fissure à l'aide de la tronçonneuse ;
- ✓ A l'aide de la chignole, on fore des trous pour poser les injecteurs ($\Phi=8\text{mm}$) ;
- ✓ Dépoussiérer la poussière et les particules supplémentaires à l'aide d'un compresseur;
- ✓ Application d'une couche d'imprégnation époxy sur les lèvres de la fissure à l'aide d'une brosse, et remplir la surface extérieure de la fissure d'un mastic époxy souple « MEDAJOINT MASTIC ».



Figure-IV-9-Préparation des supports pour l'injection.

IV-4-Réparation des fissures

IV-4-1-Mise en œuvre de la résine

Il faut bien noter qu'avant de passer à la préparation de la résine, les supports en béton doivent être secs, propres, débarrassés des parties non adhérentes du béton et correctement nettoyés, les fissures doivent être dépoussiérées soigneusement comme on a développé dans la partie précédente.

- ✓ Verser complètement l'élément B (durcisseur) dans l'élément A (résine) afin de respecter le rapport de mélange ;
- ✓ Remuer pendant 3 minutes avec un agitateur électrique, jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène ;
- ✓ Racler plusieurs fois les parois de récipient afin d'assurer une dispersion totale ;
- ✓ Ne préparer que la quantité de mélange pouvant être utilisée durant ce temps ;
- ✓ Arranger le matériel conçu pour l'injection ;
- ✓ L'application de la résine est immédiate après la préparation.

IV-4-2-Procédure de mise en œuvre des injections

- ✓ A l'aide d'un pot sous pression rempli de la préparation, et à travers des cavaliers d'injection, on injecte la résine dans les fissures jusqu'à saturation complète des injecteurs.



Figure-IV-10- Procédure de mise en œuvre de l'injection.

- ✓ L'injection terminée, laissé reposer les éprouvettes, puis réitérer les tests ultrasonores sur les éprouvettes de béton réparés afin d'inspecter la fiabilité de la réparation et l'amélioration des propriétés de béton.



Figure-IV-11-Auscultation ultrasonores des éprouvettes réparées.

Comme dernière étape de programme expérimental conçu pour ce travail, on effectue un prélèvement par carottage de béton des éprouvettes traitées par injection de la résine. Ce test peut servir à déterminer la qualité de l'injection par un examen visuel, ainsi une comparaison entre les propriétés des bétons témoins et les bétons réparés (vitesse ultrasonore, résistance mécanique à la compression).



Figure-IV-12-Prélèvement, surfaçage et écrasement des carottes réparées.

CHAPITRE-V-
RÉSULTATS &
DISCUSSIONS.

Avant d'exposer les résultats obtenus, on présente ci-dessous un mémento qui récapitule les travaux qui ont été exécutés, y compris les buts à atteindre lors de cette recherche.

- ✓ Les travaux ont été réalisés sur trois mélanges de béton à base des mêmes matériaux constitutifs tel que :
 - Un béton courant dont le diamètre maximal des granulats ne dépasse pas 25mm ($D_{\max}=25\text{mm}$), nommé **B₂₅** ;
 - Un béton courant d'un diamètre maximal des granulats est de 15mm ($D_{\max}=15\text{mm}$), qui est représenté par le **B₁₅** ;
 - Un mortier à base de sable et de ciment, nommé **M**.
- ✓ La caractérisation de profondeur des fissures des éléments en béton a été réalisée sur des éprouvettes parallélépipédiques de $(55 \times 25 \times 25) \text{ cm}^3$ testées à travers des essais ultrasonores dans les mêmes conditions pour toutes les éprouvettes.
- ✓ L'ensemble des résultats exposés dans la première section « la caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures dans les éléments en béton » présente la variation des différentes propriétés physiques mesurées (profondeurs, vitesses, résistances) en fonction de l'âge de béton, afin de pouvoir caractériser la profondeur de fissures dans les éléments en béton, ensuite parvenir à élucider l'impact de cette profondeur de fissures sur la caractéristique majeure de béton « la résistance » à la faveur des essais destructifs (compression mécanique).
- ✓ Ensuite dans une deuxième étape qui est d'ordre logique après avoir caractérisé la profondeur des fissures. On essaye de récupérer et de rénover les parties altérées de béton afin d'assurer le bon fonctionnement des structures. En faisant appel à une certaine méthode de traitement, commode, rapide, durable ... c'est l'injection des fissures en utilisant un produit qui a des caractéristiques réussites sur le plan expérimental.

V-1- Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissures dans les éléments en béton

La caractérisation de profondeur des fissures est prélevée grâce à la relation [II-2], qui prend en considération le temps de propagation d'une onde ultrasonore le long d'un parcours donné.

Les résultats obtenus sont exposés dans les tableaux ci-dessus, dedans le paramètre de temps est l'élément principal. La distance entre les deux transducteurs est de ($X_1=16 \text{ cm}$), et ($X_2=32\text{cm}$). Les transducteurs sont placés systématiquement symétriques vis à vis de l'ouverture de fissure.

Aussi cette variation est représentée sous forme de graphique afin de bien visualiser l'évolution de la profondeur en fonction de l'âge de béton.

V-1-1-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures de béton B₂₅

	Profondeur h ₁ =10cm				Profondeur h ₂ =5cm			
Temps	T ₁ [μm]	T ₂ [μm]	h ₁ [cm]	h _{1moy} [cm]	T ₁ [μm]	T ₂ [μm]	h ₂ [cm]	h _{2moy} [cm]
07 jours	79.2	118.7	9.49	9.18	73.8	123.8	6.46	6.46
	78.6	120.3	8.88		72	120.8	6.46	
14 jours	70.3	105	9.59	9.01	57.3	57.3	5.36	5.51
	68.9	107.2	8.43		100.4	100.2	5.41	
21 jours	69.1	105	9.09	8.99	57	99.6	5.43	5.38
	69.3	106	8.90		60.2	104.5	5.60	
28 jours	69	103	9.60	8.64	57.1	101.6	4.96	5.47
	71.8	114.9	7.68		60.2	102.9	5.99	
35 jours	68	102.6	9.29	8.59	56	100	4.87	5.14
	65	103.2	7.88		58	101.4	5.41	
42 jours	69.4	105.2	9.16	9.42	59	105.4	4.85	5.06
	70.8	105.4	9.68		58.5	102.9	5.26	
49 jours	69	105	9.05	9.61	58.8	104.4	5.02	5.27
	70,3	103	10.17		58.6	102	5.53	
56 jours	70.8	105.7	9,60	9.84	59.7	105	5.26	5.29
	71	104.3	10.08		59	103.5	5.33	
63 jours	73	105.3	10.66	10.10	60.1	104.9	5.46	5.26
	69.6	104.1	9.55		58.3	103.3	5.07	
70 jours	72.7	104.2	10.86	9.93	58.7	102.9	5.34	5.37
	70	106.7	9.00		59.1	103.4	5.39	
77 jours	70,1	103.4	9.96	10.59	57	101	5.07	4.96
	73.4	104.1	11.21		57	101.8	4.86	

Tableau-V-1-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures « B₂₅ ».

V-1-2-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures de béton B₁₅

	Profondeur h ₁ =10cm				Profondeur h ₂ =5cm			
Temps	T ₁ [μm]	T ₂ [μm]	h ₁ [cm]	h _{1moy} [cm]	T ₁ [μm]	T ₂ [μm]	h ₂ [cm]	h _{2moy} [cm]
07 jours	81	120.6	9.68	10.16	74	123.8	6.53	6.10
	79	114	10.64		70	121.2	5.66	
14 jours	78	113	10.52	9.56	64.2	112	5.47	5.79
	75	116	8.59		67	114	6.10	
21 jours	73	110.7	9.15	9.37	61	108	5.09	5.32
	75	112	9.59		65	113	5.56	
28 jours	71	107.3	9.24	9.55	59.4	107	4.63	5.10
	74.3	110	9.85		58.7	102	5.57	
35 jours	69.7	100.3	10.73	10.43	59	103.2	5.40	5.32
	70	102.7	10.12		59.3	104.4	5.23	
42 jours	68.2	100.3	10.05	10.39	58.9	103.1	5.38	5.54
	71.7	103.2	10.73		60.2	104.1	5.69	
49 jours	68.2	102.1	10.31	9.66	58.2	100.6	5.70	5.49
	71.7	107.4	9.02		60.3	106	5.27	
56 jours	70	106.4	9.08	9.38	59.1	104.2	5.20	5.36
	74	110.2	9.67		59.4	103.4	5.52	
63 jours	72.3	103.5	10.90	10.73	58.8	103	5.36	5.31
	73	105.6	10.57		58.6	103.1	5.25	
70 jours	70.2	105.1	9.52	9.87	58.4	102.2	5.39	5.20
	72.3	105.7	102.3		57	101.2	5.02	
77 jours	72.1	104.8	10.41	10.54	58.6	103.1	5.25	5.37
	72.8	105	10.66		58	101.1	5.49	

Tableau-V-2-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures « B₁₅ ».

V-1-3-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures de mortier M.

Temps	Profondeur $h_1=10\text{cm}$				Profondeur $h_2=5\text{cm}$			
	T_1 [μm]	T_2 [μm]	h_1 [cm]	$h_{1\text{moy}}$ [cm]	T_1 [μm]	T_2 [μm]	h_2 [cm]	$h_{2\text{moy}}$ [cm]
07 jours	83.5	121.5	10.38	10.78	70	120	5.91	6.00
	79.6	113	11.18		72.3	123.1	5.91	
14 jours	79.3	117.4	9.85	9.43	67	115	5.88	5.86
	78.1	119	9.01		66	113.5	5.83	
21 jours	82	119	10.46	9.23	68.2	117.4	5.81	5.74
	77	121.7	8.01		67	116	5.66	
28 jours	81	121	9.58	9.99	67	115.9	5.68	5.52
	77	112	10.39		65.3	114.4	5.36	
35 jours	79	118.1	9.56	10.48	61.1	108	5.13	5.57
	80.1	113	11.39		62.5	108.6	5.57	
42 jours	80	114.3	10.97	10.75	60	105.4	5.29	5.30
	79.4	115	10.53		61	107.1	5.30	
49 jours	80.3	115.1	10.86	10.76	62.9	109	5.64	5.41
	81.1	117	10.65		61.2	108	5.17	
56 jours	82.2	118.2	10.76	10.95	61.1	108.3	5.06	5.44
	82.8	117.7	11.14		62.2	107	5.83	
63 jours	82	118.2	10.68	10.85	61	107	5.33	5.53
	80	114.1	11.02		61.4	106	5.74	
70 jours	83.2	117.9	11.24	11.00	62.2	106.8	5.87	5.83
	80	115	10.77		62.7	108	5.79	
77 jours	81.3	117	10.73	10.69	61.4	107.3	5.42	5.71
	82	118.3	10.65		63.2	108	5.99	

Tableau-V-3-Caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures « M ».

V-1-4- Représentation graphique de la caractérisation ultrasonore de profondeur des fissures

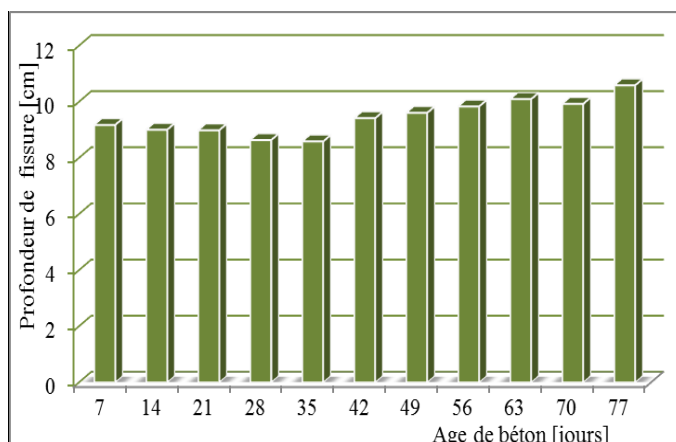


Figure-V-1- Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure. "Béton B25, h₁=10cm"

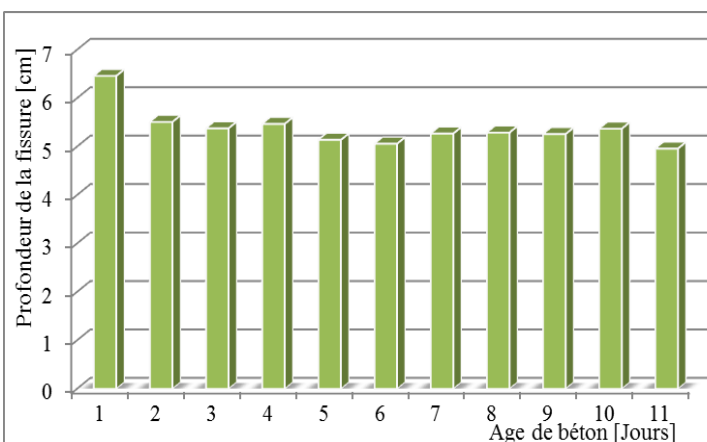


Figure-V-2- Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure. "Béton B25, h₂=5cm"

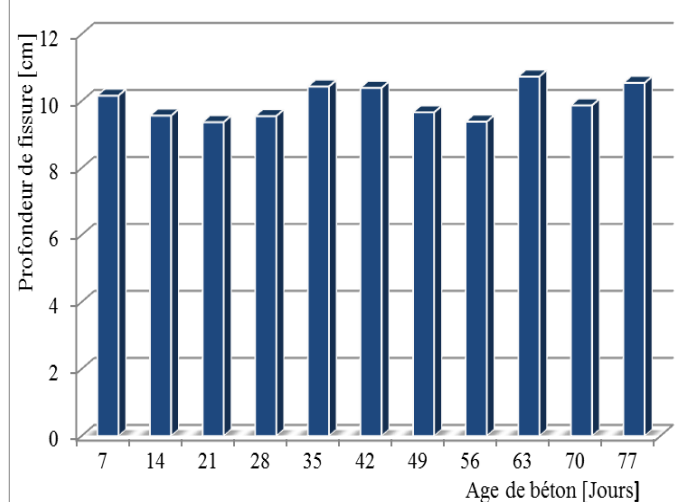


Figure-V-3- Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure. "Béton B15, h₁=10cm"

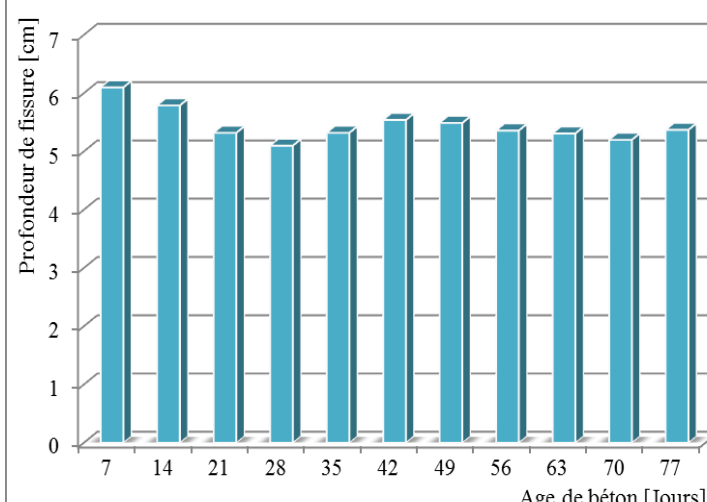


Figure-V-4- Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure. "Béton B15, h₂=5cm"

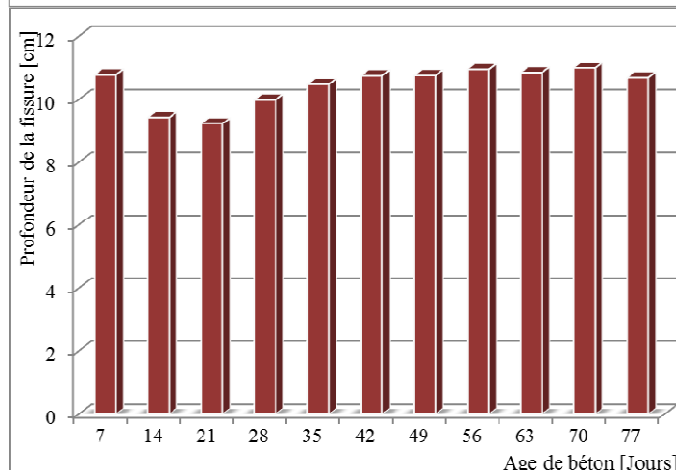


Figure-V-5- Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure H₁=10cm pour le Mortier

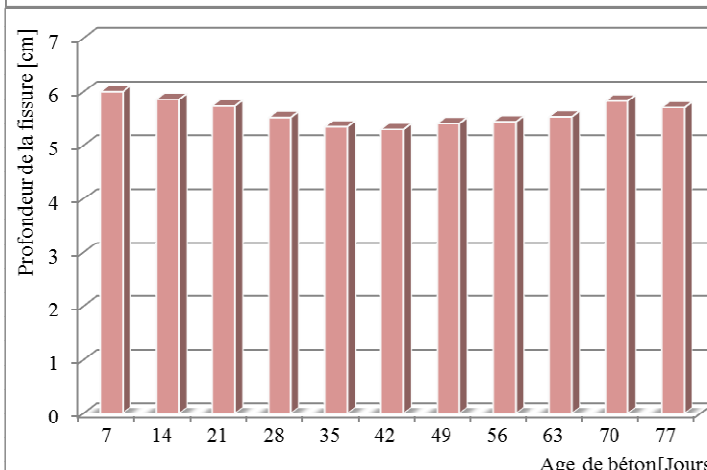


Figure-V-6- Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissure H₂=5cm pour le Mortier

Les Figures précédentes (V-1 ; V-2 ; V-3 ; V-4 ; V-5 ; V-6) illustrent la caractérisation ultrasonore individuelle de profondeur des fissures ($h_1=10\text{cm}$, $h_2=5\text{cm}$) en fonction de l'âge des trois types de bétons (le béton B_{25} ; le béton B_{15} ; et le mortier M), en utilisant les ondes ultrasonores.

Voyant que la progression de profondeur de fissures (h_1 , h_2) est une allure mouvante en fonction de l'âge pour tous les types de béton (B_{25} , B_{15} , M) dans les deux sens (des valeurs supérieures et des valeurs inférieures par rapport aux profondeurs des fissures repères). D'une façon générale, les résultats indiquent une évolution incluse dans une fourchette considérablement représentative vis-à-vis des fissures repères telles que :

- ✓ La caractérisation de profondeurs des fissures ($h_1= 10\text{cm}$) se trouve à ($\pm 5 \%$) de la profondeur de fissure réelle.
- ✓ Alors qu'elle se trouve dans un domaine de plus de (15%) de profondeur des fissures repères pour ($h_2=5\text{cm}$).

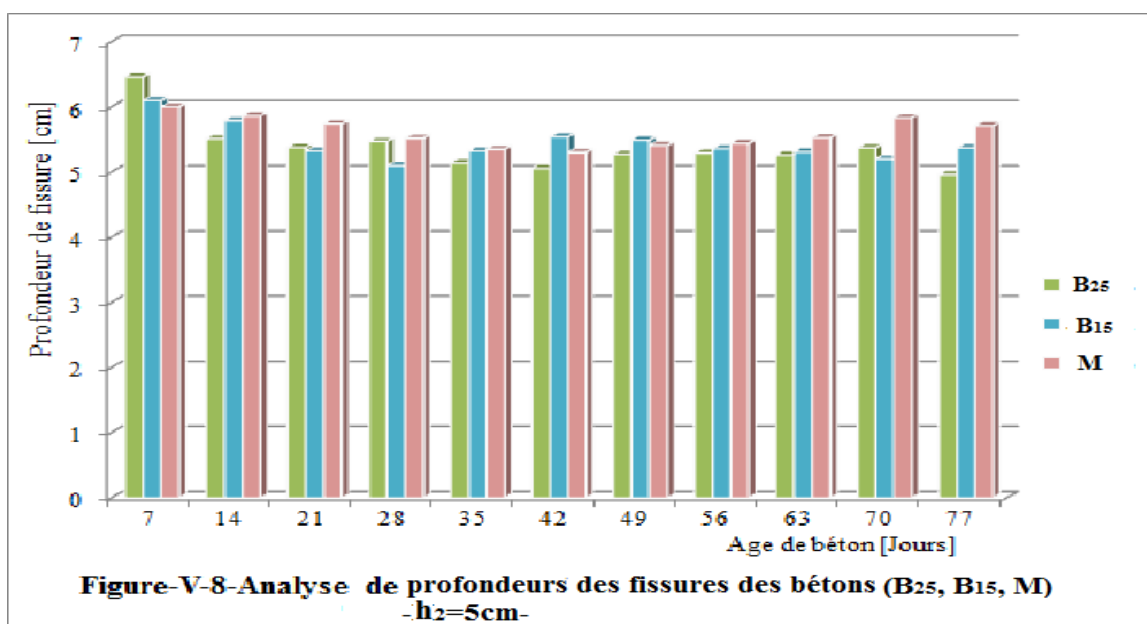
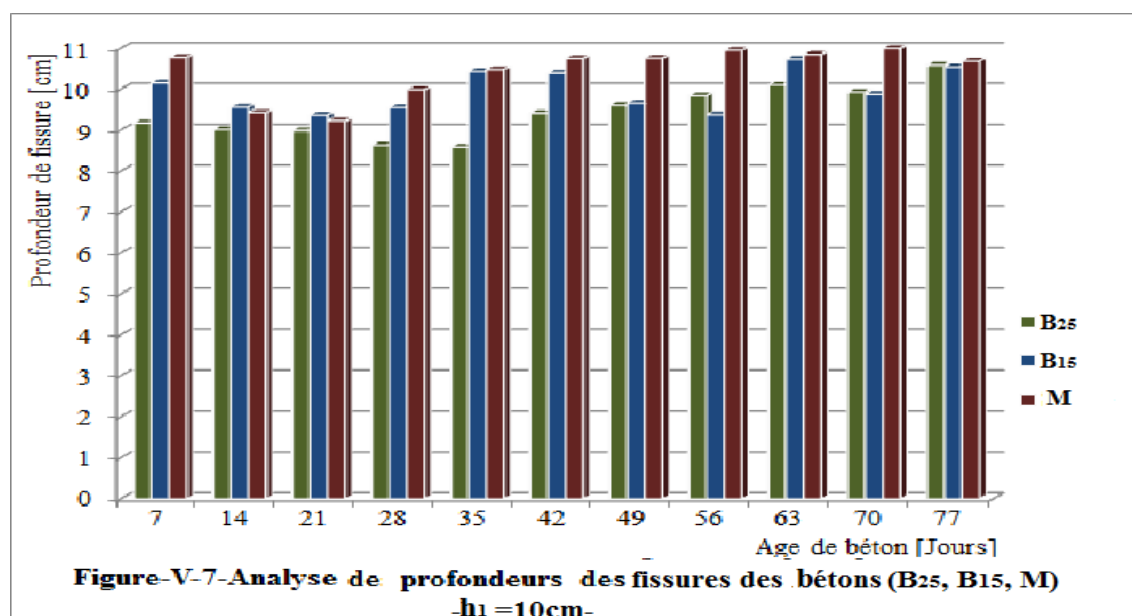
Au cours de la première semaine, les résultats de la totalité des éprouvettes ont fourni des profondeurs de fissures supérieures aux fissures référentielles. Lors de cette période, le béton est très jeune au cours d'hydratation, les liaisons granulats-ciment se renforcent et les granulats se rapprochent entre eux, ce qui contribue à avoir un béton plus compacte en fonction de l'âge, c'est le mûrissement de béton, d'où voyant l'amoindrissement de temps de propagation de l'onde, alors la diminution de profondeurs des fissures.

Ces inadéquations et ces incertitudes sont d'ordre logique, attribuées à un certain enchaînement de facteurs confrontés lors de la réalisation de ce travail :

- ✓ Le premier facteur qui est capital intrinsèque au béton, c'est l'hétérogénéité de béton qui influe fortement la propagation des ondes ultrasonores à travers des divers phénomènes physiques (chapitre I, partie I, section I-7).
- ✓ La manipulation de l'appareil est très sensible aux variations de position: un emplacement de près ou de moins des transducteurs par rapport au point de mesure altère les résultats, ce qui nécessite d'être assez attentif lors de la manipulation de l'appareil et la pose des transducteurs. Par mesure sécuritaire, il faut réitérer la même grandeur plusieurs fois afin de s'assurer des résultats.
- ✓ L'état de surface d'élément cible : une surface lisse, douce, régulière et sans cavités garantit un bon accouplage entre le transducteur et la surface des éléments, ce qui défavorise la dispersion des ondes ultrasonores.

V-1-5- Analyse de la caractérisation de profondeur de fissures par type de béton

Afin d'établir une analyse entre les essais ultrasonores des différents types de bétons, on a rassemblé dans les graphiques ci-dessous les différents bétons (B_{25} , B_{15} , M) par profondeur similaire de fissure (h_1 , h_2).



Les figures (V-7), et (V-8) présentent l'analyse de caractérisation de profondeurs des fissures ($h_1=10\text{cm}$, $h_2=5\text{cm}$) des différents types de bétons (B₂₅, B₁₅, M) ; d'où on peut constater que :

- ✓ Une fissure d'une profondeur ($h_1=10\text{cm}$) dans un mortier (M) est importante de (6%) par rapport à la même profondeur dans un béton (B₁₅), et de (12%) à l'égard de celle-ci d'un béton (B₂₅).
- ✓ Tandis que pour une fissure d'une profondeur ($h_2=5\text{cm}$) dans le même mortier, indique un chiffre de (2%) de plus en comparant à celle-ci d'un béton (B₁₅), et de (3%) au béton (B₂₅).

Cet enchaînement est dû principalement à deux facteurs :

✓ **La profondeur de la fissure elle-même**

L'écart entre les profondeurs des fissures accroît dans le même sens que la profondeur.

✓ **La granulométrie de mélange initial de béton**

Un mélange dense se caractérise par une faible porosité ce qui fait décroître le temps de propagation de l'onde ultrasonore entre les deux transducteurs.

D'après les résultats obtenus, le béton (B_{25}) présente le mélange le plus compact par rapport aux autres bétons (B_{15} , M) respectivement. En effet la présence d'une variété des granulats des diverses géométries (15/25, 8/15 ; 3/8) dans le béton (B_{25}) permet de remplir les vides et d'occuper tous les pores car les éléments constitutifs forment une bonne liaison entre eux, du fait qu'ils ont un ordre de grandeur différent, ce qui tend à avoir un béton dense et compact et évidemment un temps de propagation plus court que celui-ci du béton (B_{15}), et le mortier (M).

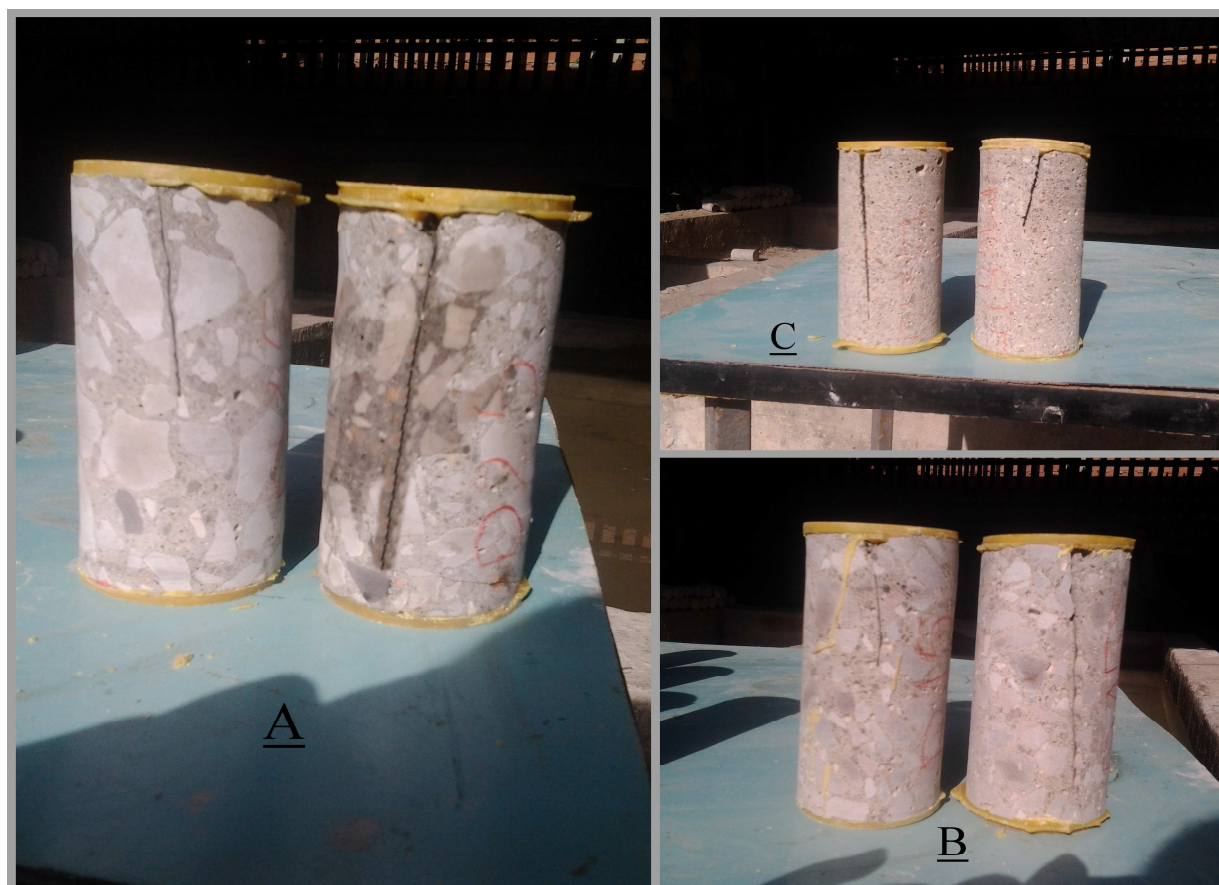
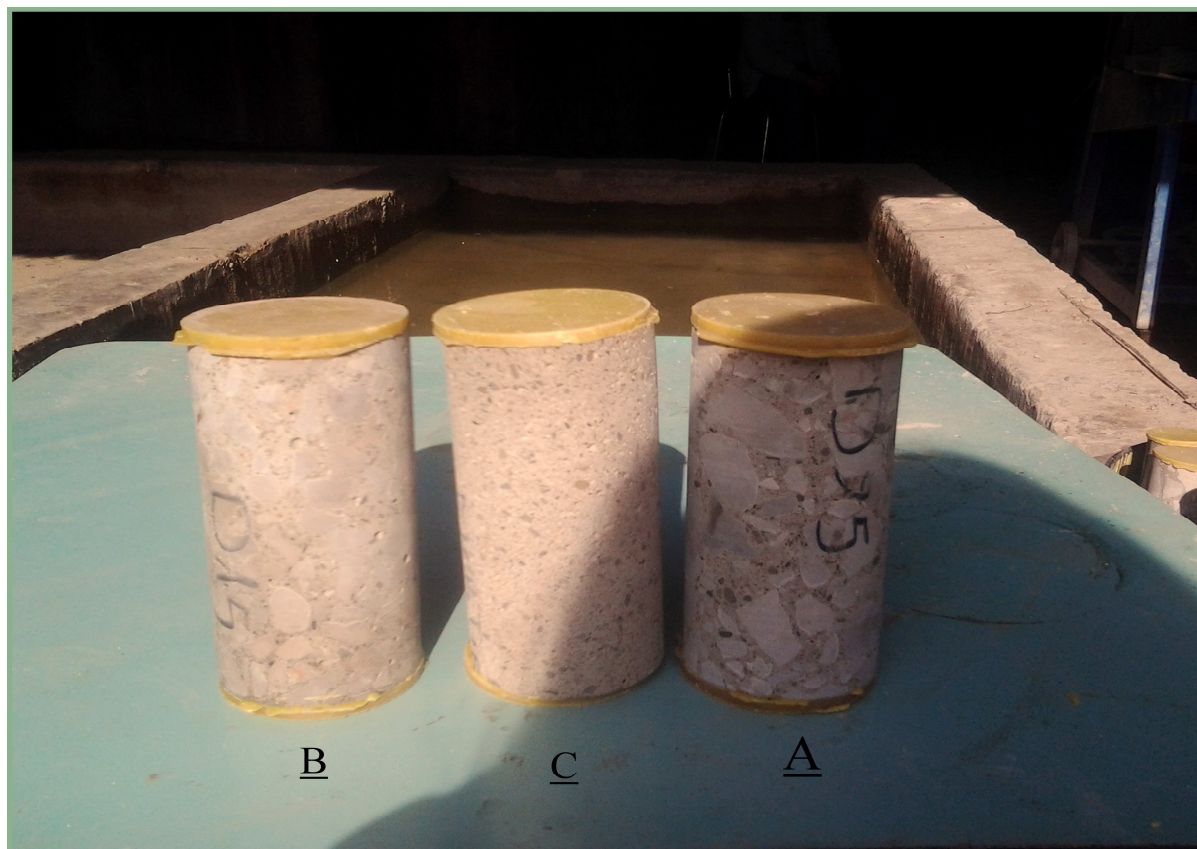


Figure-V-9-Carottes fissurées ($h_1=10\text{cm}$ et $h_2=5\text{cm}$) prélevées des différents bétons.

A-(B_{25}) ; B- (B_{15}) ; C-(M)

Voyant sur les figures (V-9 ; V-10) des carottes cylindriques normalisées, surfacées (fissurées et de témoignage), de section $(5,4 \times 10,8) \text{ cm}^2$, prélevées en utilisant le carottage des trois bétons (B_{25} , B_{15} , M).

Les fissures ont été correctement réalisées sur le (B_{25}) et (B_{15}) dans l'ouverture est de (1mm), alors que l'ouverture de fissure de mortier est de (2mm), vu les moyens traditionnels de l'élaboration des fissures. Aussi, on peut voir la bonne distribution des granulats sur tout le volume des carottes.



**Figure-V-10-Carottes des bétons témoins prélevés des différents bétons
A- (B_{25}) ; B- (B_{15}) ; C-(M).**

V-2-La variation de vitesse ultrasonore

Dans le cadre de différencier entre le béton sain (béton témoin ou béton inaltéré), et le béton dégradé (béton fissuré), on a suivi la variation de la vitesse ultrasonore en fonction de âge de béton.

Les mesures de la vitesse sont réalisées sur un parcours de ($X_1=16\text{cm}$) ; (même parcours que la profondeur de fissure).

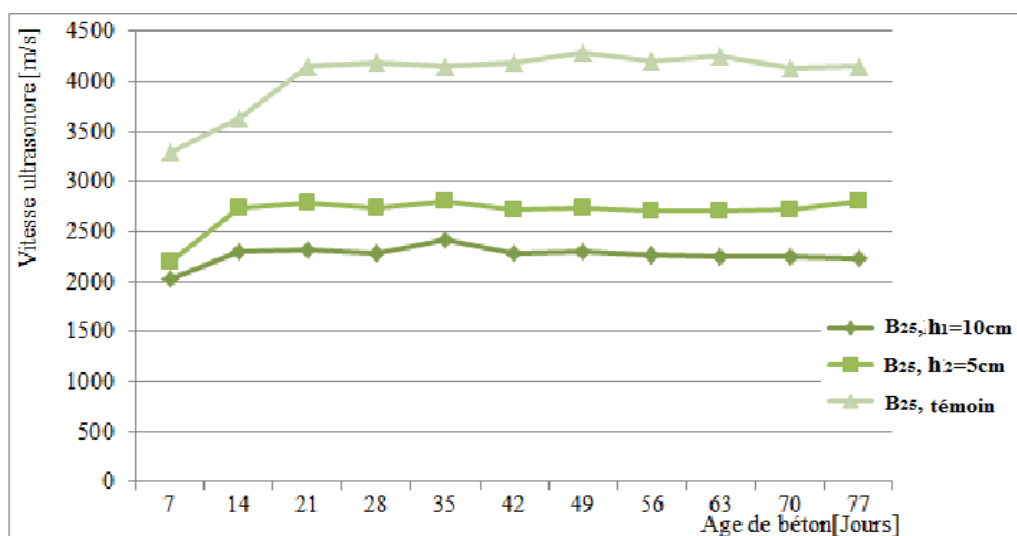


Figure-V-11-Variation de la vitesse ultrasonore de béton B25 (témoin et fissuré)

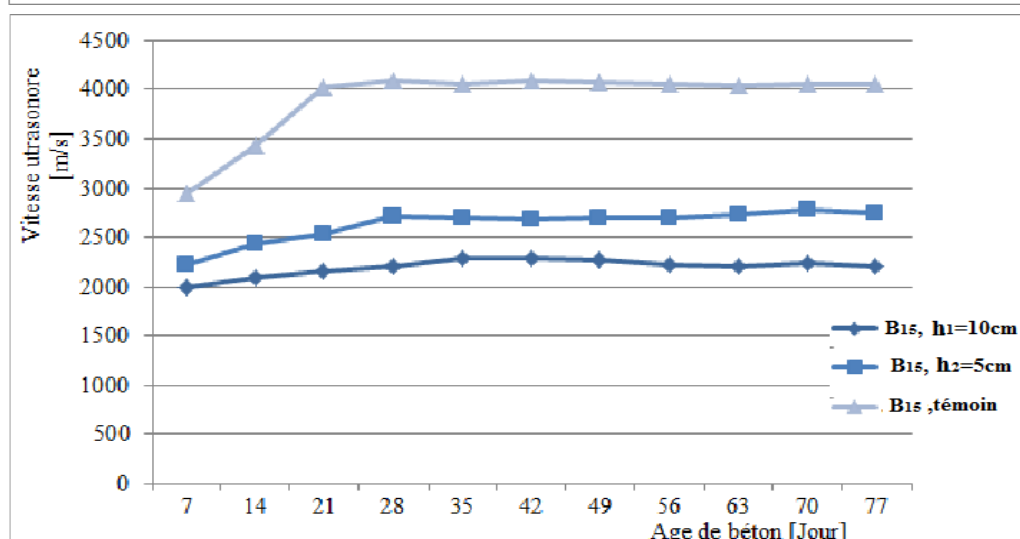


Figure-V-12- Variation de la vitesse ultrasonore de béton B15 (témoin et fissuré)

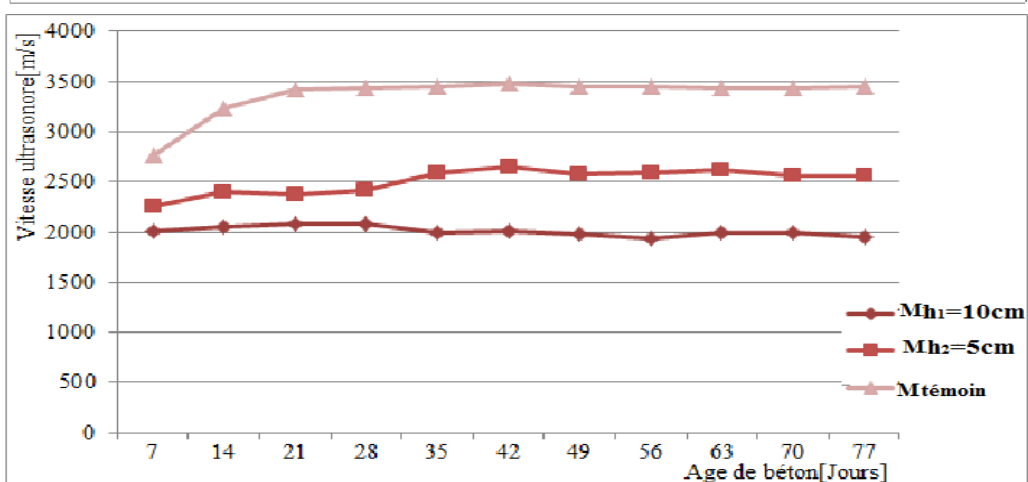


Figure-V-13-Variation de la vitesse ultrasonore de mortier M (témoin et fissuré)

Les figures (V-11, V-12, V-13) présentent les résultats individuels de la variation de vitesse ultrasonore des bétons (B_{25} , B_{15} , M) dans les parties supposées homogènes et saines (bétons témoins), et les éprouvettes fissurées de différentes profondeurs (h_1 , h_2).

- ✓ L'écart entre la vitesse ultrasonore des éprouvettes des bétons témoins et les éprouvettes des bétons fissurés quel que soit le type de béton (B_{25} , B_{15} , M) est très important d'où on s'avère que la profondeur de la fissure influe fortement la vitesse ultrasonore.
- ✓ La vitesse dans le béton témoin est de **(45%)** de plus à l'égard de la vitesse dans le même type de béton qui comporte une fissure de profondeur de ($h_1=10$ cm), et de **(34%)** plus élevée comparativement à celle-ci lorsque la profondeur est de ($h_2=5$ cm).
- ✓ La vitesse dans le béton témoin supposé sain et inaltéré accroît en fonction de son âge, sa variation est accélérée lors des premiers temps (elle passe de septième jour au quatorzième jour de (3285,42 m/s à 3619,9 m/s) pour un béton (B_{25}), de (2946,53 m/s à 3426,12 m/s) pour un béton (B_{15}), et de (2763,38 m/s à 3238,86 m/s) pour un mortier. En effet le béton est en cours d'hydratation qui se poursuit, jusqu'aux 28^{eme} jours, d'où on remarque un accroissement de la vitesse jusqu'à vingt-huitième jour où la vitesse se stabilise pratiquement.
- ✓ Tandis que l'accroissement de la vitesse est infime au fur et à mesure que la profondeur de fissure est importante (un béton (B_{15}), ayant une profondeur de fissure de ($h_1=10$ cm), la vitesse au bout du septième jour est de (2000m/s) , alors qu'elle se trouve au (2208m/s) le soixante dix-septième jour, tant que pour la profondeur $h_2=5$ cm, elle est de (2222m/s) à sept jours et de (2744m/s) le soixante dix-septième jours) d'où on constate que la profondeur de la fissure influe négativement l'accroissement de cette vitesse.
- ✓ Si on fait une analyse générale entre la vitesse des bétons témoins (béton intact), on trouve qu'un béton à granulométrie complète (B_{25}) a une vitesse supérieure de **(4 %)** de celle-ci de (B_{15}) et de **(17 %)** si on l'a comparé à la vitesse d'un mortier (M). C'est l'effet de la granulométrie.
- ✓ Nous remarquons que l'évolution de la vitesse ultrasonique des bétons suit la même tendance que celle de profondeurs de fissures.

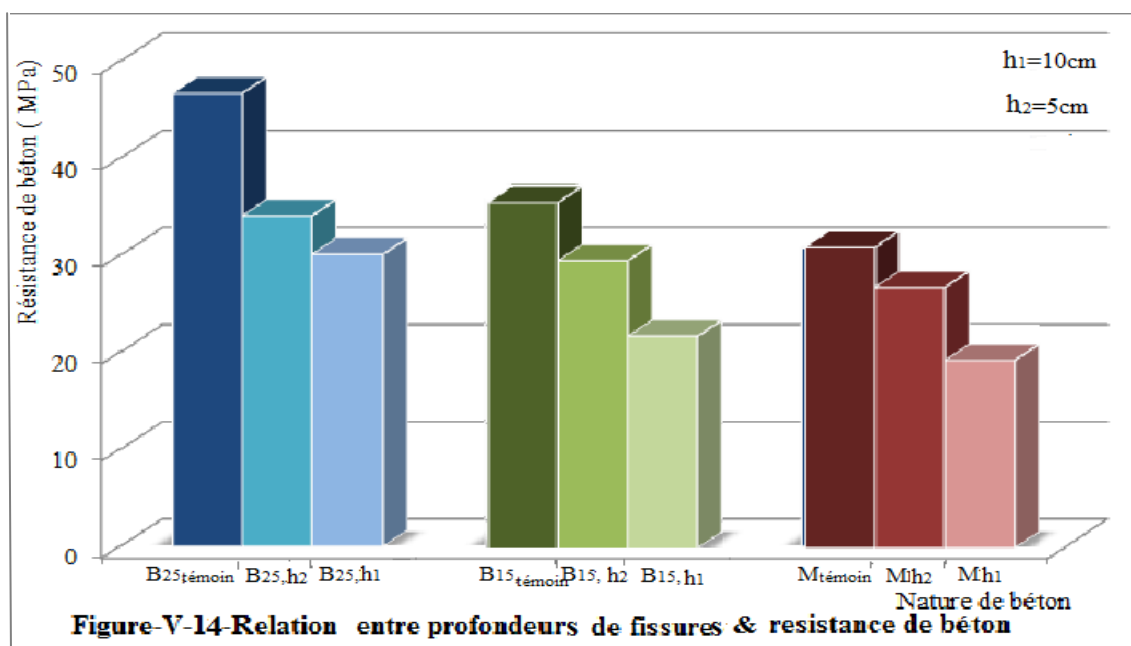
V-3-Influence de la profondeur de la fissure sur la résistance de béton

Le but de cet essai est de déterminer l'effet de profondeur de fissures sur la résistance en compression de béton comme on a décrit précédemment, et pour concrétiser ce but, on a fait appel au carottage des éprouvettes au bout de vingt-huitième jours, les résultats sont mentionnés dans le tableau (V-4).

	B ₂₅			B ₁₅			M		
	B ₂₅	B _{25, h2}	B _{25, h1}	B ₁₅	B _{15, h2}	B _{15, h1}	M	M _{h2}	M _{h1}
R ₂₈ (MPa)	46,70	34,08	30,11	35,39	29,43	21,70	30,76	26,65	19,19

Tableau-V-4-Résistance en compression.

Pour mieux visualiser cette influence, On peut assembler toutes les résistances citées en haut (tableau-V-4) dans le graphe (figure-V-12)



On peut visualiser clairement sur le graphe l'altération de la résistance mécanique à la compression des différents bétons (B₂₅, B₁₅, M). En effet les fissures agissent comme des points de fragilité dans les éléments en béton, en appliquant une force mécanique quelle que soit son amplitude, l'élément risque de s'endommager et de se briser, de plus l'existence de fissure favorise cette détérioration qu'est fonction principale de sa nature (fissure profonde ou superficielle). L'interprétation de graphe nous a conduit les résultats suivants :

- ✓ Concernant le premier type de béton (B₂₅), l'écart entre la résistance de béton témoin et le béton comportant une fissure d'une profondeur (h₂=5cm) est de **(28%)** de plus. Alors qu'il est de **(36%)** de même entre celle-ci et la résistance de béton qui englobe une fissure de (h₁=10cm).
- ✓ Pour le deuxième type de béton (B₁₅), la variation est de **(17%)** de plus entre la résistance de béton témoin et celui-ci d'une profondeur de fissure (h₂=5cm), le temps qu'elle est de **(39%)** item entre la résistance du béton témoin et le béton qui présente la fissure de (h₁=10cm).

- ✓ En dernier lieu le Mortier (M), présente une différence de résistance de **(14%)** de plus entre le mortier témoin et le mortier qui comporte la fissure ($h_2=5\text{cm}$), et **(38%)** entre les deux résistances restantes.
- ✓ D'un point de vue général, on remarque que le béton (B_{25}) présente la résistance majeure par rapport aux autres bétons quel que soit l'état de béton (témoin ou fissuré). Le béton témoin (B_{25}) présente une résistance de **(25%)** de plus par rapport à celle-ci du (B_{15}), et **(35%)** de même comparativement à celle-ci d'un mortier témoin.

La résistance mécanique en compression de béton est une fonction principale de mélange initial, chaque élément parmi les éléments constitutifs se caractérise par une résistance intrinsèque (interne), et la présence de tous ses constituants (sable, $G_{(3/8)}$, $G_{(8/15)}$, $G_{(15/25)}$), conduits à l'élaboration d'un mélange compact et résistant, et l'absence d'un parmi ces éléments abaisse la résistance de béton sans oublier le rôle de l'adjuvant qui contribue à avoir la résistance désirée.

V-4-Effet de l'injection sur les fissures

Comme suite au traitement des fissures à travers l'injection, il faut visualiser son efficacité et son impact sur les fissures, on a exécuté des essais ultrasonores sur le béton réparé afin d'établir une comparaison entre ces résultats et les résultats précédents.



Figure-V-15-Carottes réparées à l'aide de l'injection.

A-(B_{R25}) ;

B-(B_{R15})

C-(M_R)

L'analyse des résultats des travaux d'injection exécutée lors de ce travail après le carottage a conduit à des conclusions pratiques concernant le traitement des fissures en profondeur :

- ✓ Une pénétration accrue du coulis à l'intérieur de fissure.
- ✓ Voyant que l'injection a une couleur transparente, ce qui ne nuit pas à l'aspect esthétique de la structure a réparée.

V-4-1-béton B_{R25}

	Profondeur h ₁ =10cm		Profondeur h ₂ =5cm	
Temps	T ₁ [μm]	T ₂ [μm]	T ₁ [μm]	T ₂ [μm]
03 jours	38,8	91,4	37,3	90,2
	38,7	91,1	41,5	90,4
07 jours	40,1	91,6	38,1	92,2
	37,5	93,3	38,8	91,2
14 jours	37,8	88,7	37,6	93,1
	39,2	91,4	39,2	90,1
21 jours	37,8	90,4	37,9	92,2
	39	91,4	38,9	91,4

Tableau-V-5-Characterisation ultrasonore de profondeur de fissures de béton « B_{R25} ».**V-4-2-béton B_{R15}**

	Profondeur h ₁ =10cm		Profondeur h ₂ =5cm	
Temps	T ₁ [μm]	T ₂ [μm]	T ₁ [μm]	T ₂ [μm]
03 jours	38,4	91,5	38	90,8
	39,1	92	41	39
07 jours	39,7	94,3	39,5	91,2
	39,9	92	39,7	91,3
14 jours	39,1	91,8	40	38,7
	39,8	93,2	39,1	93,4
21 jours	39,5	90,4	39,9	90,2
	39,3	92,2	38,8	93,4

Tableau-V-6-Characterisation ultrasonore de profondeur de fissures de béton « B_{R15} ».

V-1-3-Mortier M_R

	Profondeur $h_1=10\text{cm}$		Profondeur $h_2=5\text{cm}$	
Temps	T_1 [μm]	T_2 [μm]	T_1 [μm]	T_2 [μm]
03 jours	50	109,1	51,2	109,4
	52,2	113,2	51	110,9
07 jours	47,3	113,5	45,8	111,1
	46,2	113,1	46,6	113,5
14 jours	46,2	113,9	46,8	112,8
	46,2	113,4	46	113
21 jours	46,4	115,3	46,3	113,2
	47,4	113,7	46	113

Tableau-V-6-Caractérisation ultrasonore de profondeur de fissures de mortier « M_R ».

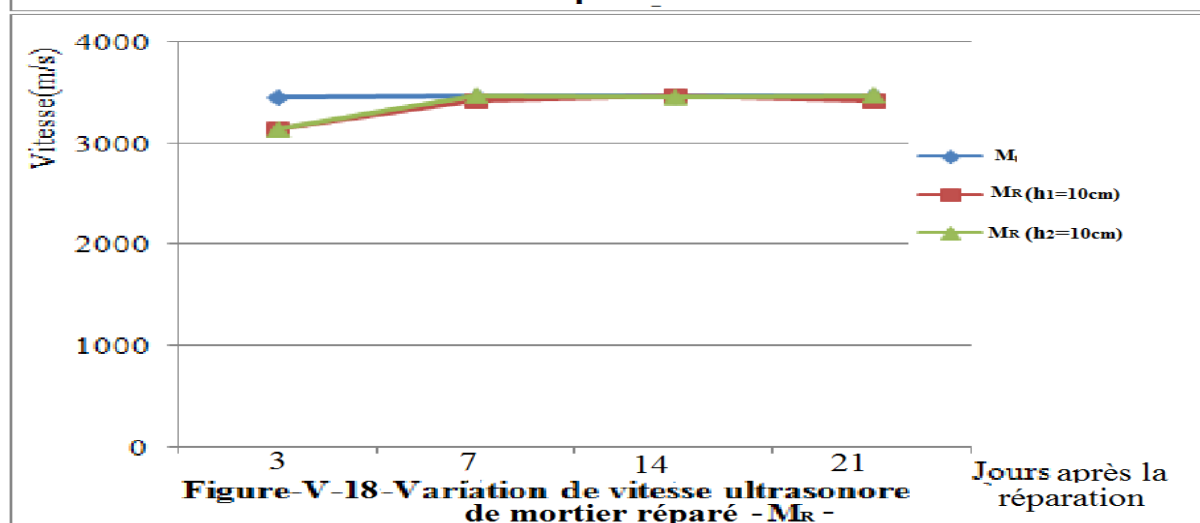
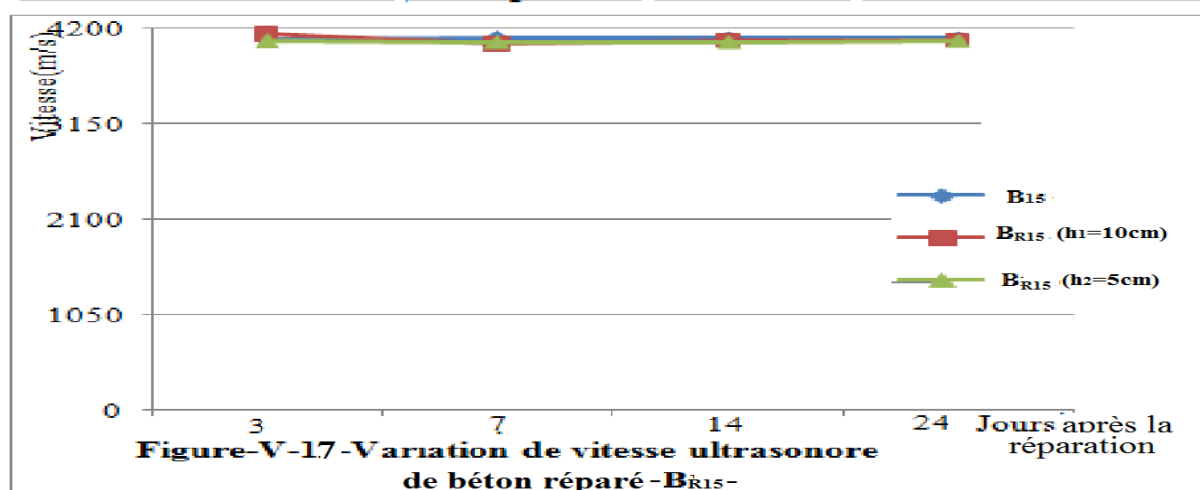
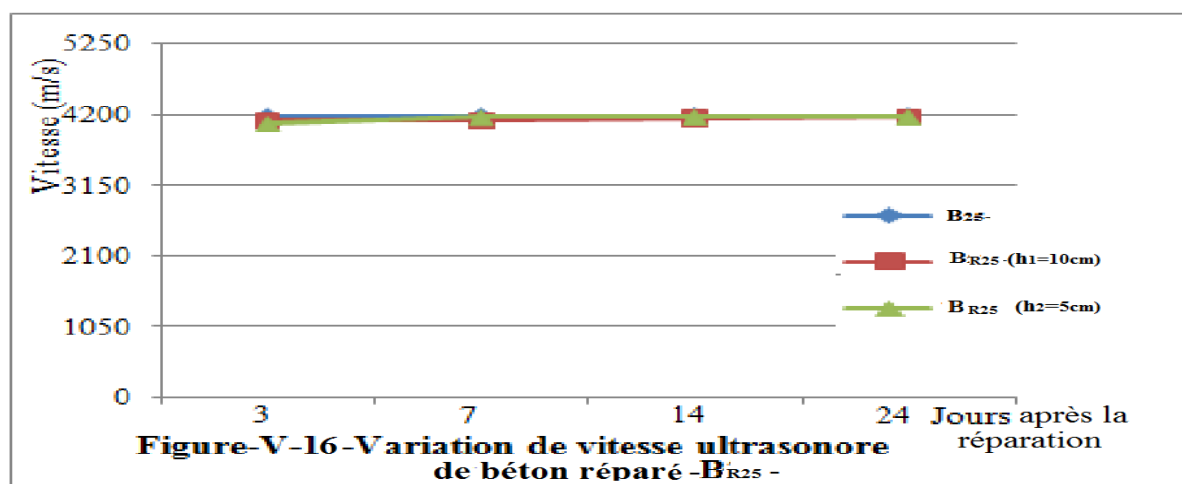
- ✓ Le temps de propagation des ondes ultrasonores des éléments de bétons réparés a diminué approximativement de **(46%)** par rapport au temps de propagation dans les mêmes éléments avant le traitement.
- ✓ Pour chaque type de bétons, l'espace de temps des ondes ultrasonores après traitement des fissures est presque idem, quelle que soit la profondeur de la fissure ($h_1=10\text{cm}$, ou $h_2=5\text{cm}$).
- ✓ Revenant à la caractérisation de profondeur de fissures en utilisant les ondes ultrasonores après traitement des fissures par injection. La quantification de cette caractérisation donne une valeur indéfinissable en employant la même relation que le calcul précédent (relation V-2).

Le vide causé par les fissures est rempli avec une substance (la résine). Elle développe une liaison avec le béton en contact, ce qui tend à diminuer fortement le temps de propagation.

De plus la variation de temps de propagation dans le béton réparé est similaire à celle-ci dans le béton témoin ce qui nous permet de dire que les fissures du béton ont été correctement traitées.

V-5-Evaluation de vitesse de béton réparé

Afin d'apprécier la qualité de la réparation, on a suivi la variation de vitesse ultrasonore des zones réparées pendant une plage de temps. On l'a comparant avec celle-ci de bétons témoins, les résultats obtenus sont illustrés par les graphes ci-après.



Les figures (V-16, V-17, V-18) représentent la variation de la vitesse ultrasonore des différents bétons (béton témoin et béton traité) dont on peut conclure que :

- ✓ Si on analyse la variation de vitesse individuellement pour chaque type de béton, on trouve que la nouvelle vitesse ultrasonore de béton après la réparation est de même ordre pour les fissures ($h_1=10$ cm, $h_2=5$ cm). Aussi ces deux variations sont analogues à la vitesse de béton témoin. Elles représentent **(99%)** de la vitesse du béton témoin, d'où on peut dire que c'est l'état idéal de la réparation malgré les hétérogénéités de béton.
- ✓ La vitesse du béton de témoignage après les 77 jours accroît légèrement encore.
- ✓ À titre de comparaison entre les résultats de différents types des bétons réparés, la vitesse ultrasonore de béton (B_{R15}) représente **(98%)** de la vitesse de béton (B_{R25}) ; et celle-ci du mortier (M_R) se trouve à **(83%)** de la vitesse de (B_{R25}).

V-6- Évaluation de la résistance du béton traité

De la même démarche qu'on a employé pour évaluer la résistance mécanique à la compression de béton dans la première partie, on évalue la résistance, des mêmes bétons subissaient la réparation tout en confrontant ces résultats à ceux de bétons de témoignage.

Le tableau V-8 indique les résultats de l'essai de compression des carottes traitées puis écrasées.

	B_{R25}			B_{R15}			M_R		
	$B_{25/T}$	$B_{25/R2}$	$B_{25/R1}$	$B_{15/T}$	$B_{15/R2}$	$B_{15/R1}$	M_T	M_{R2}	M_{R1}
R (MPa)	48,3	45,9	47,3	37	35,8	34,7	33,4	30,1	32,5

Tableau-V-8-resistance mécanique à la compression de bétons après réparation.

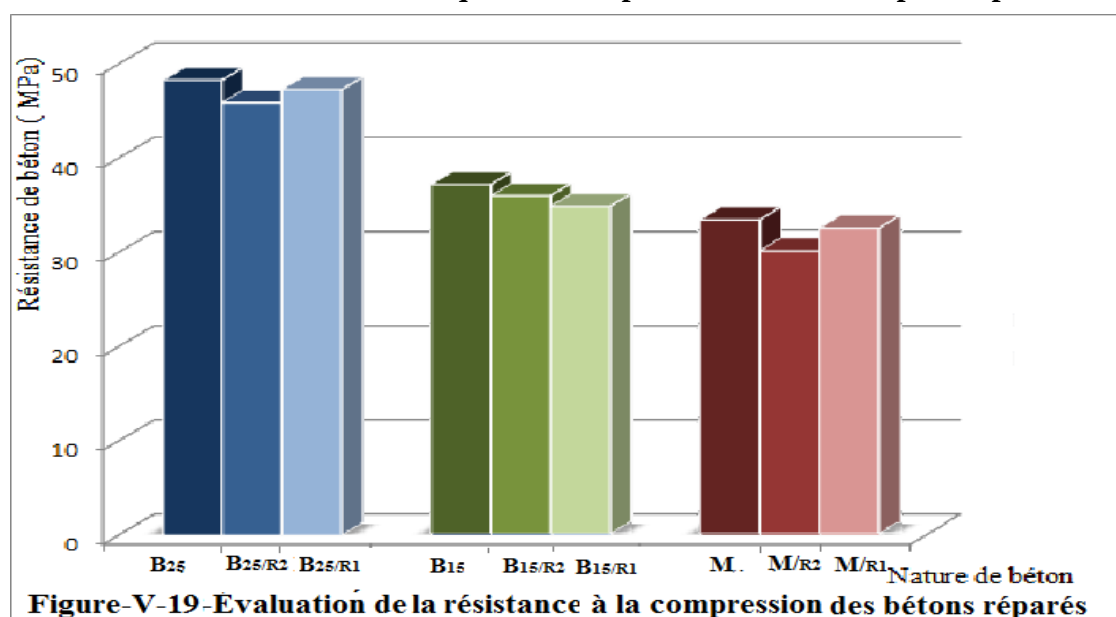


Figure-V-19-Evaluation de la résistance à la compression des bétons réparés

La figure (V-19) présente la résistance à la compression mécanique de béton conçu pour cette étude (témoin et réparé) au bout de quatre mois et demi (135 jours).

- ✓ On peut visualiser une légère croissance de la résistance de béton témoin après les 28 jours, elle est de **(4% à 7%)** de plus par rapport à la résistance des bétons témoins du 28^{ème} jour.

Alors que la résistance des bétons réparés est presque analogue à celle-ci des bétons témoins de telle sorte que :

- ✓ La résistance de $(B_{25/R2})$ est de **(96%)** de (B_{25}) , et $(B_{25/R1})$ indique **(98%)** de la résistance de béton témoin.
- ✓ La résistance de $(B_{15/R2})$ est de **(97%)** de (B_{15}) , et $(B_{15/R1})$ indique **(94%)** de la résistance de béton témoin B_{15} .
- ✓ La résistance de (M_{R2}) est de **(90%)** de (M) , et (M_{R1}) indique **(98%)** de la résistance de béton témoin.

Et comme résultat final la résistance à la compression entre les trois bétons témoins ne se diffère pas assez de la résistance qu'on l'a déterminée précédemment.

-CONCLUSION GÉNÉRALE-

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif principal de ce travail est de déployer les contrôles non destructifs dans le domaine du génie civil, en se servant des essais ultrasonores afin de caractériser la profondeur de fissures dans les éléments en béton.

Cette technique permet de simplifier d'une manière appréciable les contrôles et les inspections, quel que soit le type de béton, son âge, et à n'importe quel endroit.

Ce travail a permis également d'ouvrir d'autres voies de recherches, avant qu'une normalisation globale de cette technique d'inspection puisse être obtenue, conduisant à une maîtrise presque parfaite de détection et de traitement de pathologie de béton principalement les fissures.

Certains résultats que nous espérons intéressants vont être résumés dans la suite.

Apports de la thèse

À l'issue de ce travail, nous confirmons que la caractérisation de profondeur de fissures en appuyant sur l'utilisation des ondes ultrasonores est un procédé prouvé pour obtenir des informations de différentes natures sur les fissures telles que :

- ✓ L'identification de fissure et de son étendue (surfacique ou profonde) par rapport à l'élément ou l'ouvrage ausculté à travers la variation de vitesse ultrasonore dans les différentes zones).
- ✓ La caractérisation et la quantification de la profondeur des fissures et de son impact sur l'ouvrage (la résistance à la compression) à court et à long terme.
- ✓ Pour donner suite à cette caractérisation, qui nécessite un traitement (rénovation, entretien, réparation...). trouvant le traitement le mieux accommodé pour réparer les fissures.

Composition de béton

Semblablement aux êtres humains qui ont un cycle de vie, les structures en béton ont le même cycle. Il démarre dès le choix de la matière première (de plus petit granulat au plus grand) qui doit être trié d'une certaine complicité d'ordre géométrique. Donc pour réussir à élaborer un bon béton, quel que soit son type (béton, mortier...) durable, à long terme, qui indique de bonnes caractéristiques mécaniques ; il faut respecter chaque étape de confection depuis le début jusqu'au durcissement (choix de composition, proportion de mélange, malaxage, la cure...).

Les constituants ne doivent pas contenir de substances nocives en quantités telles qu'elles puissent avoir un effet préjudiciable sur la durabilité du béton ou induire une corrosion des armatures, ils doivent être aptes à l'emploi pour l'utilisation envisagée du l'ouvrage.

Lorsque l'aptitude générale à l'emploi d'un constituant est établie, cela ne signifie pas qu'il puisse être utilisé dans tous les cas ; ou quelle que soit la composition du béton. Par contre, la formulation du béton et les constituants doivent être choisis de manière à satisfaire aux exigences spécifiées pour le béton frais et durci (la résistance, la

durabilité, l'usage de l'ouvrage, les propriétés du site, la protection contre la corrosion ...) ; tout en tenant compte du procédé de production et de la méthode choisie pour l'exécution.

Caractérisation ultrasonores de la profondeur des fissures dans les éléments en béton.

Quelle que soit la formulation qui était choisi pour confectionner un béton, il subira des dégradations et des détériorations avec le temps (à court ou à long terme), typiquement les fissures ont une action dévastatrice et dommageable sur les structures.

Les essais ultrasonores sont fondés sur la génération d'une onde ultrasonore entre deux transducteurs le long d'un parcours autour de la fissure durant un temps. Ils présentent un procédé très opérationnel pour la caractérisation de profondeur de fissures dans les éléments en béton (rapidité, accessibilité, simplicité...).

L'estimation de la profondeur de fissures en utilisant la méthode ultrasonore fournit une information globale avec une erreur situant dans un intervalle de (-5%, +15%). Elle est changeable en fonction de plusieurs paramètres, dont le plus dominant est la granulométrie.

La vitesse ultrasonore aussi est un bon indicateur sur la profondeur de fissures, l'écartement de la vitesse dans les différentes zones testées en fonction de la profondeur de fissure. Aussi cette vitesse représente un bon signe sur l'état général de béton dans les zones inspectées par rapport au voisinage de béton.

L'abaissement de la résistance de béton à la compression est une conséquence nuisible de la présence des fissures. Elle est fonction de deux paramètres : la profondeur de la fissure, et la granulométrie de béton.

Réparation et traitement des fissures

Toutes les structures en béton vont éventuellement souffrir d'une forme ou d'une autre de détérioration dont les plus dangereuses sont les fissures, il s'impose de les entretenir ou de les réparer pour qu'elles soient aptes à remplir leurs rôles.

Afin de réaliser des travaux d'entretien ou de réfection de qualité et durable, il est primordial de déterminer la ou les cause(s) du problème. C'est pourquoi quand vient le temps de remédier à des problèmes de fissuration, on doit d'abord inspecter l'ouvrage non seulement pour déterminer le type de fissure et sa morphologie, mais aussi pour savoir auxquelles conditions est exposée cette fissure.

Cela est absolument nécessaire pour effectuer un choix éclairé de la méthode de réparation à suivre, et des produits à utiliser pour obtenir des meilleurs résultats.

L'injection est la solution la plus adéquate pour réparer un ouvrage en béton. En effet, la procédure en elle-même n'est pas particulière, par contre, décider quelles procédures, équipements ou produits, sont les plus appropriés rendre la tâche d'injection très difficile dans certaines situations surtout que l'injection constitue une technique ou il est difficile, même pratiquement impossible par des moyens directs de voir la fissure à traiter ou de juger de la qualité des travaux, c'est exactement en

ce point où intervient les essais ultrasonores qui aident à quantifier et à énumérer les détails des fissures. Vu les résultats, on peut dire que cette technique est très commode et efficace pour la réparation de béton, elle aide à améliorer toutes les propriétés de béton.

-BIBLIOGRAPHIE-

- [01] Dreux and J. Festa,. « Nouveau guide du béton et de ses constituants » Eyrolles ; P(6, 7, 8) ; 1998.
- [02] F.de Larrard. « Concrete mixture proportioning, a scientific approach ». E&FN SPON Editors. P(7) ; 2000.
- [03] A.M .Neville. « Propriétés des bétons », Traduction de l'édition Anglaise de « Properties of concrete » Editor. Eyrolles, (Longman) ; P(8,126) ; 2000.
- [04] J. Baron and R. Sauterey. « Le béton hydraulique - Connaissance et pratique ». Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris,.P(8) ; 1982.
- [05] D. Breysse, A. delagrave, B. gerard, H. hornain, J.Marchand. « Étude du vieillissement d'origine chimique ou mécanique des matériaux à matrice cimentaire » État de l'art Note technique, contrat LERM/EDF-DER, n° :T20D47BREY 92 ; 1992.
- [06] Pigeon.M « Composition et hydratation du ciment Portland ». Séminaire progrès dans le domaine du béton. Québec, P(36-72) ; 1981.
- [07] V.Baroghel, Bouny « Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons — méthode, analyses, interprétations ». Thèse de doctorat, ENPC, 470 pages ; 1994.
- [08] O.Yaman, G.Inci, N.Yesiller, H.M.Aktan «Ultrasonic pulse velocity in concrete using direct and indirect transmission» ACI Materials Journal. Vol. 98. No: 6 ; 2001.
- [09] Ould Naff S.et Al « Detection of chemical damage in concrete using ultrasound », Ultrasonics P (40,247- 251).
- [10] Elaqla Hossam « Étude de l'endommagement et du renforcement de composites à matrice cimentaire » P (157).Thèse Sciences des Matériaux. INSA de Lyon; 2004.
- [11] S. K. Ramamoorthy, Y. Kane, and J. A. Turnera « Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete », Department of Engineering Mechanics, W317.4 Nebraska Hall, University of Nebraska-Lincoln.
- [12] M.Goueygou, O.Abrahan, J.F.Lataste « A comparative study of two non-destructive testing methods to assess near-surface mechanical damage in concrete structures », NDT&E International ; 2008.
- [13] S.W.Shin, J.Zhu, J.Min, J.S.Popovics « Crack depth determination in concrete using energy transmission of surface Waves» ACI Materials. Vol: 105. No: 5 ; 2008.
- [14] « Causes, evaluation, and repair of cracks in concrete structures », ACI 224.1R-07. American Concrete Institute, ACI Committee 224 ; 2007.
- [15] J.H.Bungey, S.G Millard, M.G.Grantham « Testing of concrete in structures », 4 ed. Taylor & Francis; 2006.
- [16] « Development priorities for non destructive examination of concrete structures in nuclear plants » OECD-NEA ; 1988.

- [17] « Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art » (2^{ème} partie) – Fascicule 03. Direction des routes, Ministère de l'Équipement ; 1998.
- [18] « Diagnostic des ouvrages en béton armé : état – méthodes – prévisions du vieillissement ». Journées d'études de la commission Construction-Bâtiment du CEFRACOR, St.Rémy-lès-Chevreuse ; 12-13 octobre 1998.
- [19] Mathieu Rossât « Diffusion des ondes ultrasonores sur des obstacles solides sphéroïdaux, application au contrôle non destructif en béton » ; 2007.
- [20] M. Rossât, G.Corneloup V.Garnier, J.F.Chaix « Amélioration de la modélisation de la propagation des ondes ultrasonores dans les milieux diphasiques » ; 2007.
- [21] P.Sheng « Introduction to wave scattering localization, and mesoscopic phenomena ». Academic Press Inc ; 1995.
- [22] Hernandez M. G. et Al « Porosity estimation of concrete by ultrasonic NDT » , Ultrasonics P (38, 531-536).
- [23] Yaman I.O- Aktan H.M- Hearn N «Active and non-active porosity in concrete»; Part II:Evaluation of existing models. Newspaper of Materials and Structures. P (110-116); 2002.
- [24] 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, P(111-120) ; 1997.
- [25] Rayleigh L. Proc. Roy.Soc «On waves propagating along the plane surface of an elastic solid » London., P(4-11) ; 1885.
- [26] Royer.D, Clorennec.D «An improved approximation for the Rayleigh wave equation », Vol 46, P(23-24) ; 2007.
- [27] François saint pierre «Suivi de l'évolution de la réaction alcalis-silice par méthodes ultrasoniques et par tomographie sonore »-thèse de doctorat en sciences appliquées- Université de Sherbrooke- faculté de génie civil –Canada.
- [28] J. Jouhaneau «Notions élémentaires d'acoustique», CNAM, collection Acoustique appliquée, Paris ; 1994.
- [29] P. Baille hache «Une histoire de l'acoustique musicale», CNRS édition ; 1998.
- [30] Danie. R. Raichel «The science and applications of acoustics », Second edition, Springer ; 2006.
- [31] D. Mercier «Le livre des techniques du son », édition Masson ; 1975.
- [32] A. Fischetti «Initiation à l'acoustique », Sciences Belin Sup ; 2001.
- [33] M. Chion et G. Reibel «Les musiques électroacoustiques », édition sud ; 1976.
- [34] P. LIPPI «Acoustique Générale », édition de physique ; 1994.

- [35] A. Lambert, Y. Pralus et J. Rivenez «Ultrason propagation des ondes ultrasonores »niveau1, Edition CETIM ; 1997.
- [36] Sh.ailesh Gokhale « Determination of applied stresses in rails using the acoustoelastic effect of ultrasonic Waves». Thesis of doctorat, Mumbai University. India ; 2007
- [37] R.M.White et F.W.Volmer « Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves ».Applied physics letters 7:314 ; 1965.
- [38] K. Mansour « Électricité et Ultrasons » Optique, Edition de l'université MENTOURI Constantine ;1999.
- [39] M. Dausat « Ultrasonographie vasculaire diagnostique » (Théorie et pratique) Edition Vigot ; 1991.
- [40] Cours de Bernard Guiraut « Le son numérique », classe de composition électroacoustique du CNR de Nice ; 1998.