

M / 624.747

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Conception et Calcul des Constructions 3C

Présenté par : **TIMBO ABDOULAYE**



**Thème : CONTROLE NON DESTRUCTIF DES
OUVRAGES EN BETON PAR LES ULTRASONS**

Sous la direction du Dr. **BENOUIS Abdelhalim**

Junin 2012





REMERCIEMENTS

Je rends graces à Dieu de m' avoir permis de terminer ce modeste travail.
Je tiens également à exprimer toute ma reconnaissance à monsieur **BENOUIS A.HALIM** pour sa disponibilité, ses conseils et particulièrement pour l' aide qu' il m' a apportée pendant toute la durée de ce travail.
Mes dernières pensées vont à ma famille et à tous mes ami(e)s pour leurs encouragements, leurs soutiens et pour les moments partagés.

Résumé

La durée de vie des ouvrages peut être réduite par des agents extérieurs, des causes liées à la qualité originelle ou à des sollicitations d'exploitation. Des pathologies apparentes ou cachées peuvent survenir. Pour déterminer leur origine, leur étendue réelle et leur mécanisme, il convient d'effectuer un diagnostic. Selon les désordres observés, différentes techniques sont utilisées pour les caractériser.

L'objectif de cette étude est de présenter un moyen de contrôle de la qualité des ouvrages largement utilisée dans le domaine du Génie Civil : **Auscultation Ultrasonique**.

L'auscultation par ondes ultrasonores permet de contrôler la qualité du béton afin de détecter des zones de différentes natures, de détecter et dimensionner des défauts et d'estimer la résistance à la compression du béton. Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de Poisson des bétons de structures. Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans l'élément à contrôler.

Sommaire

Introduction générale	7
1. PATHOLOGIES DES OUVRAGES EN BETON ARME	8
1.1. Corrosion des aciers d'armature	8
1.1.1. Depassivation des armatures	8
1.1.2. Amorçage et propagation de la corrosion	11
1.1.3. Désordres dus à la corrosion	11
1.2. Attaque chimique et réaction interne	13
1.2.1. Processus gel/dégel.....	13
1.2.2. Réaction de gonflement interne	14
1.2.3. Les réactions chimiques.....	15
1.3. Lixiviation	16
1.4. Incendie	16
1.5. Dégradation d'ordre mécanique	17
Conclusion.....	17
2. DIAGNOSTIC	18
2.1. Choix des investigations	19
2.2. Relevé visuel	19
2.3. Investigations non destructives	20
2.3.1. Mesures pachométriques (détecteurs d'armatures)	20
2.3.2. Mesures pour l'évaluation de la probabilité de corrosion des armatures	21
2.3.3. Essai au scléromètre (dureté superficielle).....	23
2.3.4. Contrôle magnétique.....	24
2.3.5. Les techniques acoustiques.....	24
2.4. Méthodes destructives	26
2.4.1. Carottages.....	26
2.4.2. Test à la phénolphthaléine	27
Conclusion.....	29
3. CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR LES ULTRASONS	30
3.1. Les types d'ondes ultrasonores	30
3.2. Propagation des ondes ultrasonores	34
3.2.1. Propagations d'ondes en milieu hétérogène.....	34
3.2.2. L'atténuation	36
3.2.3. Influence du milieu.....	38
3.3. L'appareil à ultrasons	41
3.3.1. Description.....	41
3.3.2. Effet piézoélectrique.....	41
3.3.3. Palpeurs piézoélectriques.....	42
3.4. Principe de la mesure par ultrasons	42

3.4.1. Détermination de la vitesse de propagation de l'onde	43
3.4.2. Méthodes de mesure.....	44
4. CORRELATION PROPRIETES ULTRASONS/PROPRIETES DU BETON.....	55
4.1.Corrélation : résistance à la compression / vitesse du son	55
4.1.1. Mode opératoire.....	55
4.1.2. Influence de la composition du béton.....	56
4.2.Corrélation : Vitesse ultrasonore/constantes élastiques	56
4.3.Corrélation : vitesse ultrasonore/porosité	57
4.3.1. Mesure de la porosité.....	58
4.3.2. Relations entre la vitesse des ultrasons et la porosité.....	59
4.4.Corrélation perméabilité/ vitesse du son	61
4.4.1. Mesures de perméabilité	61
4.4.2. Mesure de la vitesse ultrasonore.....	64
Conclusion sur auscultation ultrasonore.....	65
Conclusion générale.....	66
Bibliographie.....	67

LISTE DE FIGURES

Fig. 1.1: Avancement du front de dépassivation en fonction du temps	9
Fig :1.2 : Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé	11
Fig 1.3 : Types de fissures provoquées par la corrosion des armatures.....	11
Fig 1.4 : Schématisation de l'influence combinée du gel et des sels de déverglaçage.....	14
Fig 1.5 : Fissuration causée par la réaction alcalis-silice.....	14
Fig 1.6 : Fissuration par l'expansion du béton.....	15
Fig 1.7 : Lixiviation du béton.....	16
Fig 2.1 : Schéma de principe du pachomètre.....	20
Fig2.2a : Quadrillage avec point	21
fig 2.2b : Fenêtre pachométrique.....	21
fig 2.2c : fenêtre pachométrique avec analyse de points au logiciel.....	21
Fig 2.3 : Ligne de détection des cadres dans une poutre en béton armé.....	21
Fig 2.4 : Méthode de détection de la corrosion des armatures	22
Fig 2.5 : Mesure de vitesse de corrosion.....	23
Fig 2.6 : Mesure au scléromètre.....	24
Fig 2.7 : Le contrôle magnétique	24
Fig 2.8 : Schéma de principe d'une mesure Radar.....	25
Fig 2.9 : Prélèvements par carottage.....	25
Fig2.10: Cristal de chloroaluminate	27
Fig2.11 : Test à la phénolphtaléine	28
Fig 3.1 : Ondes ultrasonores longitudinales.....	31
Fig 3.2 : Ondes ultrasonores transversales (cisaillement).....	32
Fig 3.3 : Ondes de Rayleigh (surface).....	33
Fig 3.4 : Ondes de Lamb.....	33
Fig 3.5 : Diffraction multiple des ondes par l'hétérogénéité.....	35
Fig 3.6 : Atténuation en fonction des 3 domaines fréquentiels.....	37
Fig 3.7 : Ausculteur-ultrasonique.....	41
fig 3.8 : oscilloscope.....	41
Fig 3.9 : Structure d'un palpeur ultrasonore	42
Fig 3.10 : Principe de la mesure par ultrasons.....	43
Fig 3.11 : Dispositif de mesure des ultrasons et transducteurs utilisés	44
Fig 3.12: mesure en transparence.....	45
Fig 3.13 : mesure en semi-transparence.....	47
Fig 3.14. mesure en surface.....	48
Fig 3.15 : principe de détermination de l'épaisseur d'un bicouche.....	49
Fig 3.16 : Exemple de Dépouillement d'une mesure en surface.....	49
Fig 3.17 : Description de la morphologie d'une fissure dans le béton.....	50
Fig 3.18a : Principe de détermination de l'épaisseur de fissure	51
Fig 3.18b : Exemple de Dépouillement d'une mesure de l'épaisseur de fissure.....	51
Fig 3.19 : détermination de fissures par système automatisé.....	51
Fig 3.20a : Ondes rétrodiffusées dans le béton.....	52
fig 3.20b : Signal rétrodiffusé simulé et enveloppe.....	52
Fig 3.21 : transducteur émetteur-recepteur.....	54
Fig3.22a : Faisceau rétrodiffusé : à pastille.....	54
Fig3.22b : Faisceau rétrodiffusé : à émetteur récepteur séparés.....	54
Fig 4.1a : Mesure en transparence	56
fig 4.1b: l'essai d'écrasement à la presse.....	56

Fig 4.2 : détermination de la porosité.....	58
Fig 4.3 : Evolution de la porosité des bétons en fonction des rapports S/S+G et E/C.....	59
Fig 4.4 : Relation entre la porosité accessible à l'eau et vitesses ultrasonores	60
Fig 4.5 : Principe de fonctionnement d'un appareil de mesure de la perméabilité à l'eau.....	62
Fig 4.6 : Coefficient en fonction du rapport E/C.....	63
Fig 4.7: Coefficient en fonction du rapport E/C pour le béton, mortier et de ciment.....	63
Fig 4.8a : Mesure en transmission direct.....	64
Fig 4.8b: Mesure en transmission indirect	64

Partie 1 :

**PATHOLOGIE DES OUVRAGES EN
BETON ARME**

INTRODUCTION GENERALE

Depuis plus d'un siècle, une grande majorité de structures sont construites en béton armé. Ces derniers remplissent des fonctions diverses qui sont indispensables à la vie des populations. Cependant leur durée de vie qui constituent la durée pendant laquelle ils sont en service, peut être réduit par des agents extérieurs, des causes liées à la qualité originelle ou à des sollicitations d'exploitation. Des pathologies apparentes ou cachées peuvent survenir. Pour déterminer leur origine, leur étendue réelle et leur mécanisme, il est indispensable d'effectuer un diagnostic. Ceci permettra d'éclairer sur les décisions à prendre quant à la réparation et les techniques de préventions à utiliser sur l'ouvrage concerné.

Selon les désordres observés, différentes techniques sont utilisées pour les caractériser.

L'objectif de cette étude est de présenter l'une de ces techniques largement utilisée dans ce domaine : **Auscultation Ultrasonique**.

En effet de par sa facilité d'utilisation et pour son utilité, il permet de détecter de nombreuses pathologies dans les ouvrages aussi neufs qu'anciens.

C'est ainsi dans le cadre de ce projet une étude approfondie a été faite sur cette technique, allant de la présentation de l'appareil de mesure jusqu'à l'interprétation des résultats obtenus, en passant par la détermination propriétés des matériaux auscultés.

Les grandes lignes de cette étude se définissent comme suit :

En **Première partie** nous allons faire une vue générale sur les désordres qui peuvent être observés sur les ouvrages et ainsi déterminer selon le cas les causes et les facteurs qui les favorisent.

La **Second partie** présente les différentes phases du diagnostic d'un ouvrage ainsi qu'un ensemble non exhaustif de moyens et de techniques pour caractériser l'origine et l'étendue des désordres.

La **troisième partie**, sera l'occasion d'étudier en profondeur la technique d'auscultation ultrasonique en exposant le principe de fonctionnement de l'appareillage utilisé, l'interprétation des résultats, les limites de cette technique et dans quels cas il est pertinent de l'utiliser.

L'objectif de la **quatrième partie** sera de faire le lien entre les paramètres déterminés par la technique de contrôle par ultrasons et les propriétés des bétons, en faisant des corrélations entre ces différents paramètres.

En on présentera dans la **cinquième partie** un ensemble de techniques de réparations qui peuvent être préconiser selon les origines et l'état de dégradation des ouvrages en question.



Introduction

Les principales causes de dégradation des bétons proviennent des attaques physiques et chimiques supportées dans le temps par les structures placées dans un environnement plus ou moins agressif.

Les principaux types de dégradations du béton armé peuvent être classés suivant 3 catégories :

- Corrosion des armatures.
- Attaque chimique et réaction interne du matériau béton.
- Dégradations d'ordre mécanique et structurelles.

Nous allons étudier pour chaque catégorie :

- Les milieux, les conditions et le type de structure ou d'exploitation qui favorisent l'apparition de ces défauts
- Les désordres typiquement observés sur les structures atteintes de ces dégradations.

1.1 Corrosion des aciers d'armature

Les bétons armés sont au contact d'un milieu naturel : atmosphère, eaux ou sols. Ces milieux contiennent souvent des produits qui sont agressifs vis-à-vis du béton ou des armatures.

Le phénomène de corrosion des armatures est probablement le phénomène de détérioration du béton armé le plus répandu. Pour que ce phénomène se développe il suffit que les éléments de structure soient exposés à l'humidité. La corrosion s'opère d'autant plus vite que l'enrobage de béton est faible et que la structure est exposée aux chlorures.

Les parties d'ouvrages souvent touchées :

- Dans les bâtiments, les balcons et acrotères sont souvent les plus touchés du fait, soit de leur minceur, soit de la difficulté à maintenir un enrobage suffisant exposés aux intempéries et à l'humidité.
- Dans les parkings et bâtiments industriels, ce sont souvent les poteaux et les dalles les plus touchés (agents chimiques ou sels).
- Pour les ponts et ouvrages d'art, les piles au voisinage des chaussées, les tabliers et les équipements de tablier car ces éléments sont en contact avec les sels de déverglaçage.
- Les cheminées (industrielles) soumises à un environnement sévère.
- Les structures situées en bord de mer qui souffrent de l'agression des chlorures.

1.1.1 Depassivation des armatures

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

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



La corrosion des armatures est issue d'un processus électrochimique qui ne peut se produire que si certaines conditions sont réunies. En effet pour qu'un acier se corrode, il doit y avoir simultanément :

- un électrolyte ayant une conductivité ionique non négligeable ;
- une quantité suffisante d'oxygène accédant à la zone cathodique ;
- la présence d'un agent agressif.

La depassivation de l'acier peut être due à deux causes :

- Lorsque le front de carbonatation du béton a atteint l'armature
- La pénétration dans le béton de suffisamment d'ions chlorure Cl^- jusqu'à l'armature.

Si l'un de ces 2 phénomènes se produit, le pH du béton chute et l'acier n'est plus protégé. Une fois que l'acier d'armature est depassivé et est en contact simultané avec de l'oxygène et de l'eau, la dissolution de l'acier a lieu ; corrosion sous la forme de formation de rouille puis perte de section.

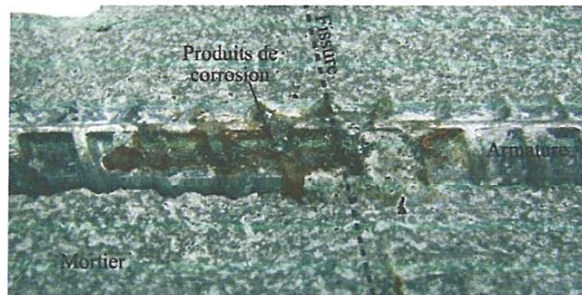
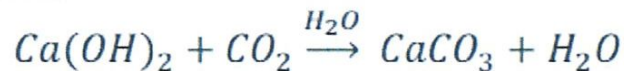


Fig 1.1 : Avancement du front de depassivation en fonction du temps

a) La carbonatation

La carbonatation est engendrée par réaction entre le dioxyde de carbone de l'air et certains constituants du béton tel que le ciment. Le dioxyde de carbone gazeux pénètre par diffusion dans le réseau poreux du béton et réagit avec la portlandite $Ca(OH)_2$ pour former des carbonates tel que le calcite $CaCO_3$, ce qui provoque un abaissement du pH à 9 environ, suivant la réaction suivante en milieu aqueux :



La carbonatation est un phénomène progressif qui, avec le temps, atteint des couches de plus en plus importantes.

On peut ainsi suivre l'évolution de la profondeur de carbonatation $x(t)$ en fonction du temps grâce à des lois empiriques de la forme (Loi de Fick):

$$x(t) = k * D * t$$

Avec D : coefficient de diffusion (diffusivité de la carbonatation).



Le CO₂ présent dans l'atmosphère se diffuse dans les pores du béton et se dissout en acide au contact de la solution interstitielle. Cette acidification conduit à la dissolution des hydrates et notamment de la portlandite, abaissant ainsi le pH de la solution à une valeur inférieure à 9, en réduisant la passivation des aciers et permettant l'amorçage de la corrosion des armatures.

La réaction bilan de carbonatation de la portlandite indique que l'eau est libérée dans le réseau poreux.

Les produits de corrosion formés provoquent des décollements aux interfaces acier-béton.

La vitesse de carbonatation est fonction de nombreux paramètres dont les plus importants sont la perméabilité et le taux d'humidité relative du milieu ambiant. La vitesse de carbonatation est maximale pour une humidité comprise entre 40% et 80%. Dans les environnements secs, la quantité d'eau est insuffisante pour dissoudre le CO₂, alors que dans les environnements très humides, le béton étant saturé, la diffusion de CO₂ est considérablement ralentie.

b) Corrosion en présence de chlorures

Les chlorures agissent dans les mécanismes de corrosion en diminuant la résistivité de l'électrolyte et en permettant un amorçage plus rapide de la corrosion en dépassant la couche superficielle. La corrosion qui en résulte sous forme de piqûres à la surface de l'acier est une corrosion localisée. Seule une faible surface externe est affectée, on dit qu'elle est localisée. L'attaque se prolongeant en profondeur dans l'acier, la perte de section rapide entraîne une chute de la capacité portante de la structure. Les ions chlorure, véhiculés par l'eau, pénètrent dans la solution interstitielle du béton jusqu'à l'armature. Ils pénètrent dans le béton par diffusion à travers la porosité ou le long d'une fissure. Les ions chlorure associés aux hydroxydes présents dans la solution provoquent la destruction de la couche de passivation de l'armature et abaissent le pH de la solution. La corrosion peut alors commencer.

Les chlorures présents dans le béton peuvent provenir de deux sources différentes. Soit ils sont présents au moment du gâchage : utilisation d'eau contenant des chlorures ou agrégats contaminés. Soit ils proviennent de l'environnement (atmosphère marine, sels de déverglaçage, produits chimiques) et sont diffusés dans le béton. Les chlorures existent sous deux formes dans le béton :

- Les chlorures libres qui sont dissous dans la solution interstitielle ;
- Les chlorures piégés ou liés qui sont combinés à des hydrates du ciment et à des agrégats, ou absorbés physiquement sur les parois des pores.

Seuls les chlorures libres présentent un danger pour la corrosion des barres d'armatures. De plus les chlorures catalysent la réaction.

Lorsqu'un certain taux d'ions chlorures est atteint, appelé taux critique, la couche passivée devient instable. Une valeur de 0,4 % par rapport au poids du ciment a été établie comme une limite de dépassivation de l'acier. Cette valeur, largement utilisée dans la pratique, est considérée comme très conservatrice et dans de très nombreux cas, aucune corrosion n'a fait son apparition pour une telle teneur en chlorure.



1.1.2 Amorçage et propagation de la corrosion

La corrosion des armatures dans le béton est divisée en deux phases : une phase d'incubation et une phase de propagation :

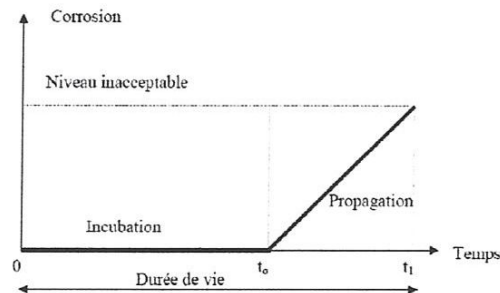


Fig :1.2 : Évolution de la dégradation d'une structure en béton armé

La phase d'incubation correspond à une période pendant laquelle les agents agressifs pénètrent dans le béton d'enrobage jusqu'à l'armature.

Quand les agents agressifs atteignent le niveau critique qui va provoquer la dépassivation de l'acier, la corrosion s'amorce puis se développe à une vitesse qui dépend des paramètres favorisant l'avancement du phénomène de corrosion.

Le temps t_0 correspond au passage de la phase d'incubation à la phase de propagation.

1.1.3 Désordres dus à la corrosion

La corrosion des armatures a souvent pour conséquences des symptômes visibles sur le parement, tels que fissurations au droit des armatures, décollements de béton, éclats et épaufures. Mais d'autres mécanismes peuvent être à l'origine de ces dégradations.

Les fissures créées par le gonflement de la barre consécutif à la formation de la rouille sont à différencier des fissures de retrait et des fissures de flexion ou d'effort tranchant.

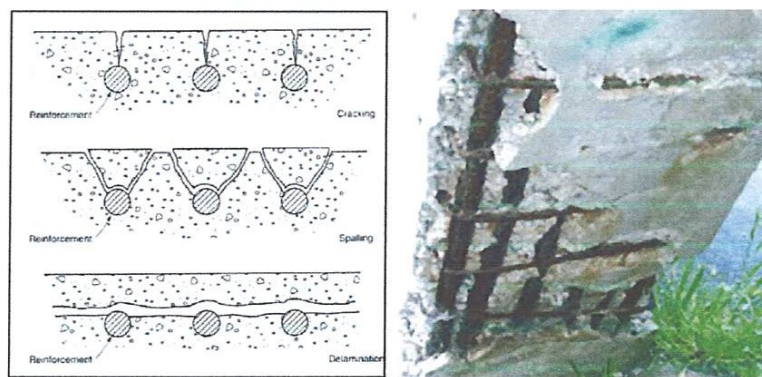


Fig 1.3 : Types de fissures provoquées par la corrosion des armatures

Lorsque le stade de corrosion est avancé, les armatures corrodées sont souvent apparentes et des traces de rouille sont visibles.

La forme, l'étendue des désordres, leur intensité dépendant à la fois de la position des armatures (enrobage et espacement), de la qualité du béton d'enrobage (compacité et homogénéité), et de l'environnement (nature de l'agent agressif).

Ainsi, lorsqu'une corrosion se manifeste, il est raisonnable de s'attendre à ce que le processus de dégradation s'étende au-delà de la dégradation visible. C'est pourquoi des moyens d'investigations capables de nous donner des informations sur l'état des armatures dans les zones ou celles-ci sont recouverts de béton sont utilisés.

a) Facteurs influents sur la corrosion des armatures du béton

Les facteurs qui influencent la pénétration des chlorures ou du dioxyde de carbone et par conséquent la corrosion des armatures sont les propriétés des matériaux (composition du ciment, porosité du béton, pH, ...), la réalisation de la construction (temps de cure, ...) et les actions de l'environnement (concentration en chlorures, en CO₂, température, humidité relative, ...).

On donne dans ce paragraphe aux paramètres fortement variables comme la température, la concentration en chlorures, la nature de l'armature et la résistivité du béton (porosité).

b) La température

La variation de température influence le potentiel de la réaction qui est régi par la loi de Nernst. D'après Liu et Weyers, une augmentation de la température accroît la vitesse de corrosion [Liu, 1998]. Ce phénomène peut s'expliquer d'une part par le fait que les processus anodiques (oxydations des composants de l'acier) et cathodiques (réduction des protons en milieu acide) sont activés thermiquement. Il en résulte un courant d'échange c'est-à-dire une vitesse de corrosion augmentant avec la température. Une élévation de 10 à 20°C multiplie par deux la vitesse de corrosion en situation de corrosion active.

Le changement de température dans le béton entraîne le changement d'autres paramètres.

Cornell et Schwertmann ont expliqué dans leurs études que la température avait une influence directe sur la nature des oxydes formés dans le béton [Cornell, 2003]. L'effet total de la température sur le taux de corrosion dans le béton est très complexe et contrôlé par l'interaction de plusieurs autres facteurs. L'élévation de température augmente la vitesse de la réaction mais peut également agir sur un autre facteur de corrosion. Par exemple, l'abaissement de solubilité de l'oxygène dans l'eau, lorsque la température augmente, est un cas où la corrosion se ralentit par manque d'oxygène. D'autre part, en milieu aéré, une élévation de température facilite la diffusion de l'oxygène dans la solution augmentant le courant d'échange.

c) Porosité du béton

Les caractéristiques du réseau poreux (porosité, distribution des tailles de pores,...) déterminent les propriétés de transfert. Ces propriétés de transport du béton vont évoluer dans le temps du fait de la carbonatation et de la fissuration qui modifient le réseau poreux et par conséquent la cinétique de corrosion.

Plus la porosité du béton est forte, plus la phase liquide peut être importante et par conséquent plus la résistivité est faible. Plus le béton aura une résistivité élevée, plus la diffusion des ions agressifs sera limitée et le courant de corrosion sera faible.

Dans le cas de structures en béton armé totalement immergées dans l'eau, le taux de corrosion est contrôlé par l'oxygène fourni. Le faible taux d'oxygène ralentit le processus de corrosion.

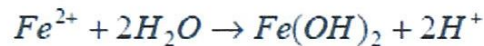
d) La concentration en chlorures

Les ions chlorures conditionnent la solubilité des produits de corrosion et l'existence de dépôts [Marcotte et al, 2003]. Leur présence dans le béton armé a une influence sur la corrosion puisque leur présence induit un risque de localisation de la corrosion, notamment par piqûre [Lacombe, 1990], augmentant le courant de corrosion.



D'une part, une concentration critique est nécessaire pour que la dépassivation des aciers débute, ce taux limite est fonction du ratio entre les ions chlorures et les ions hydroxydes présents dans la solution interstitielle. D'autre part, lorsque la concentration en ions chlorure augmente, la conductivité du béton augmente, favorisant le passage des ions chlorures vers l'armature.

En milieu chloruré, lorsque la dissolution du métal se poursuit sous le dépôt, l'excès d'ions Fe^{2+} ou Fe^{3+} produits conduit à la diffusion inverse des anions Cl^- pour respecter la neutralité des charges. Les cations métalliques s'hydrolysent selon la réaction :



1.2 Attaque chimique et réaction interne

Cette catégorie regroupe les causes suivantes de dégradations du béton armé :

- Processus gel/dégel et gel du béton.
- Réactions de gonflement interne : réaction alcali-granulats.
- Réaction sulfatique interne, telles que par exemple attaques sulfatiques, attaques acides

Les structures concernées par une attaque gel/ dégel sont celles saturées en eau de manière modérée à élevée et situées en zone de gel. On peut citer comme exemple un ouvrage horizontal n'ayant pas de pente d'écoulement des eaux.

La réaction alcali-granulats peut en principe apparaître dans tous les éléments en béton, mais surtout dans les éléments exposés à l'eau, mur de soutènement et éléments de ponts, de même que les barrages.

Les attaques chimiques dépendent quant à elles uniquement de l'environnement direct de la structure. Elles ont essentiellement lieu sur des structures industrielles abritant des activités chimiques ou métallurgiques, les stations d'épuration, structures agricoles et les abords de routes.

1.2.1 Processus gel/dégel

Après un nombre important de cycles gel/dégel, certains bétons peuvent se déliter en surface et se désagréger. L'effet d'éclatement provoqué par l'eau entrain de geler est la cause principale des dégâts du béton dus au gel quand le degré de saturation dépasse 90%. Ce phénomène se produit lorsque le béton en surface, se gorge d'eau et gèle de façon répétée.

Les pores capillaires absorbent l'eau de la surface du béton. Si l'eau gèle, l'accroissement de volume vaut 9% du volume d'eau. Dans le cas d'une formation de glace dans un pore complètement rempli, l'accroissement de volume va générer une pression hydraulique qui va créer un éclatement du béton en surface.

Influence combinée du gel et des sels de déverglaçage (ouvrages concernés : piles de ponts, talus)

- La réaction du sel avec la glace est une réaction endothermique et créé un refroidissement plus rapide de la structure
- Les sels de déverglaçage provoquent une absorption plus rapide de l'eau.
- Le point de congélation de l'eau dépend directement de la teneur en sel.



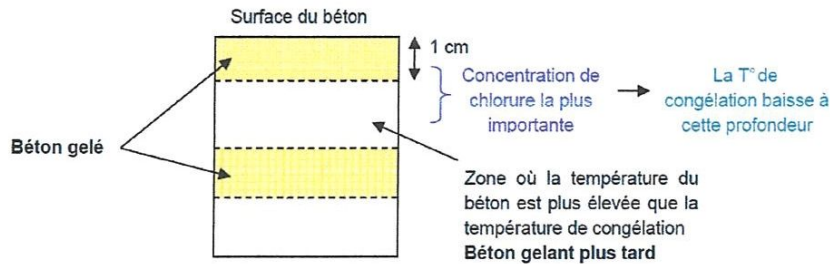


Fig 1.4 : Schématisation de l'influence combinée du gel et des sels de déverglaçage

Si le refroidissement se poursuit, la couche intermédiaire va également gelé mais la pression de congélation qui en résulte ne pourra pas s'affaiblir dans les couches voisines déjà gelées et cela peut conduire à l'éclatement de la couche superficielle

1.2.2 Réaction de gonflement interne

a) Réaction Alkali-granulat

La réaction alcalis-granulats consiste en une réaction chimique entre certains types de granulats et les ions hydroxyles (OH-) associés aux alcalis dans le ciment.

Généralement, les alcalis proviennent du ciment Portland, mais ils peuvent également provenir d'autres ingrédients du béton ou de l'environnement. Dans certaines conditions, cette réaction peut conduire à une expansion et à une fissuration nuisible du béton. La détérioration du béton par la réaction alcalis-granulats est généralement lente, mais progressive.

Afin qu'une réaction alcali-granulats ait lieu, les 3 conditions suivantes doivent être réunies mais ne donnent pas forcément lieu à la réaction :

- Présence de granulats réactifs (silice mal cristallisée).
- Milieu ambiant humide.
- Teneur suffisante en alcalins dans le béton (calcium, sodium).

Il existe deux types de réaction alcali-granulats.

✚ Réaction alcalis-silice

C'est la plus courante des réactions alcali-granulats; elle est causée par la présence, dans le béton, de certains granulats siliceux que l'on trouve dans certains granites, gneiss, roches volcaniques, grauwackes, argilites, phyllites, cornéennes, tufs et calcaires siliceux.

La réaction alcalis-silice produit un gel qui absorbe de l'eau et augmente de volume. La pression exercée par le gel qui gonfle fracture les particules de granulat et provoque la propagation des fissures dans le béton environnant. Généralement, la réaction alcalis-silice entraîne une fissuration en faïençage.

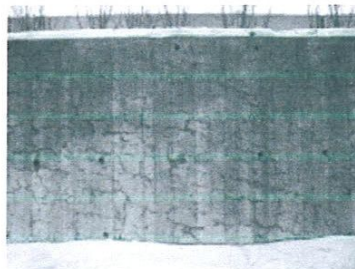


Fig 1.5 : Fissuration causée par la réaction alcalis-silice

Réaction alcalis-carbonate

Dans la réaction alcalis-carbonate, certains granulats de calcaires réagissent avec les ions hydroxydes associés aux alcalis du ciment (ou provenant d'autres sources telles que les sels déverglaçants) et provoquent le gonflement des particules de calcaire, ce qui entraîne l'expansion et la fissuration du béton.

Cette réaction entraîne dans le béton une fissuration semblable à celle que provoque la réaction alcalis-silice. Il y a lieu de noter que les granulats calcaires peuvent subir tant une réaction alcalis-silice qu'une réaction alcalis-carbonate.

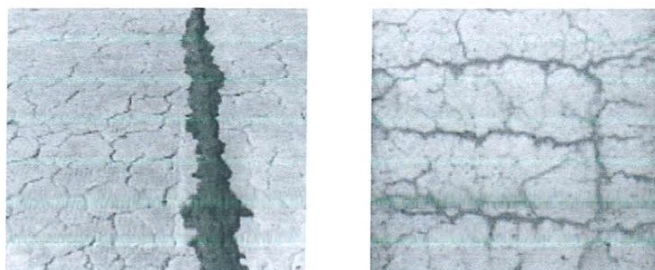


Fig 1.6 : Fissuration par l'expansion du béton

b) Réaction sulfatique interne

La réaction sulfatique interne résulte d'une remobilisation des sulfates initialement contenus dans la matrice cimentaire qui, normalement, se transforment en ettringite primaire lors de la prise du béton. Si cette réaction ne peut avoir lieu, l'ettringite secondaire (également dite différée) expansive peut se former ultérieurement dans le béton durci et provoque son gonflement et sa désorganisation.

Cette remobilisation des sulfates nécessite une élévation de température notable et durable du béton pendant sa prise (par exemple, $> 75^{\circ}\text{C}$ pendant plus de 4 heures), la réaction se produit donc essentiellement dans des bétons étuvés ou des pièces massives (piles de pont de section importante par exemple)

1.2.3 Les réactions chimiques

Les principaux agents externes d'agressions chimiques sont les suivants :

- Les eaux pures et milieux acides :

Lorsqu'ils entrent en contact avec le béton, ils dissolvent la chaux produite par l'hydratation du ciment, faisant alors progressivement diminuer le pH et ils annihilent ainsi la passivation des aciers mais aussi la résistance du béton. Plus le pH est faible, plus l'attaque est importante. On emploie le terme de lixiviation du béton.

La présence de dépôts de calcite blanchâtre à la surface du béton est le signe d'une telle attaque.

Les attaques du béton peuvent être dues à des acides forts mais également à des acides acétiques, lactiques, butyriques ou formiques en provenance de sucreries, laiteries, papeteries, tanneries...

- Les eaux basiques.
- Les solutions salines ou les sols :

Entrent dans cette catégorie les sulfates, chlorures, nitrates, sulfures et le magnésium. Ils dissolvent partiellement les éléments calciques des ciments.



Les chlorures sont à l'origine de la corrosion des armatures.

Les sulfates provoquent la formation de cristaux d'ettringite et ainsi un phénomène d'expansion.

- L'eau de mer.
- Les actions biochimiques.

1.3 Lixiviation

La réaction réclame de l'eau et plus spécialement un environnement chaud et humide.

La plupart des ouvrages peuvent être affectés par des eaux de ruissellement sous l'effet de la pluie, de l'eau de mer, des eaux souterraines et de la neige. Le béton comprend outre les granulats, la pâte de ciment qui est fortement basique avec un pH autour de 12,5 de par sa solution interstitielle. La pâte de ciment est composée de 15 à 20% de portlandite, de silicates de calcium hydratés, d'aluminates et de sulfoaluminates de calcium hydratés.

Les eaux de ruissellement sont en général moins basiques ce qui entraîne un déséquilibre entre le milieu extérieur et le béton. Cela produit des sels insolubles ou solubles (ce qui est plus préjudiciable) puisque la dissolution est associée à un lessivage de la chaux très soluble dans l'eau. Ce phénomène, appelé lixiviation, s'accroît si le béton contient beaucoup de chaux comme le ciment Portland pur. Il entraîne des dégradations et une fragilisation du matériau en augmentant la porosité interne et en diminuant les propriétés mécaniques du béton. Cela se manifeste par l'apparition d'efflorescences en surface du béton.



Fig 1.7 : Lixiviation du béton

1.4 Incendie

L'élévation de la température du béton entraîne un certain nombre de transformations physico-chimiques et microstructurales qui vont conduire à un changement de propriétés mécaniques et de transfert.

Au cours d'une élévation de température, les différentes catégories d'eau du béton (eau libre et eau liée) sont successivement éliminées en fonction de la nature des minéraux constitutifs.

Les transformations physico-chimiques en particulier le départ de l'eau chimiquement liée se traduit par une augmentation considérable de la porosité du béton, qui entraîne alors un changement des propriétés mécaniques et de transfert du matériau.

La résistance à la compression après échauffement dépend de la composition du béton, de l'âge, des formes et dimensions des éléments de structure et de l'état de contrainte du béton lors de l'incendie. La vitesse de montée en température et le temps de chauffe ont aussi une influence sur la résistance en compression.

Les désordres physiques peuvent être un détachement d'écaillles d'une épaisseur allant de quelques millimètres à quelques centimètres ou bien un éclatement de la structure

1.5 Dégradation d'ordre mécanique

Les dégradations d'ordre mécanique se caractérisent par des fissures. Toutefois le béton est normalement fissuré déjà à l'état de service. Les fissures « normales » sont liées au fonctionnement du matériau béton armé et ne sont pas préjudiciables.

Ces fissures dites normales sont :

- Les fissures dues à la flexion et ayant une ouverture de 0,2 à 0,3 mm.
- Et plus généralement des fissures ayant jusqu'à 0,4 mm d'ouverture.

Les autres fissures sont des fissures dites « anormales » et peuvent être provoquées par :

- De mauvaises dispositions constructives (mauvaise disposition de l'armature, mauvaise composition du béton)
- Les effets de la température.
- Les tassements du sol de fondation.
- Les charges et forces agissant sur la structure.

Ces fissurations anormales ont pour conséquences l'altération de la rigidité de la structure porteuse et la formation d'articulations non désirées ce qui provoque un changement de flux de forces et du système statique. Elles favorisent également la pénétration des facteurs de corrosion (humidité, CO₂, chlorures...).

Ces fissures dues à des dégradations mécaniques sont à distinguer des autres fissurations ayant pour origine des pathologies.

Conclusion

Le but de ce premier chapitre était de mettre en évidence les différentes pathologies qui peuvent être observées sur les ouvrages construits. On peut s'apercevoir qu'il en a une variété, qui diffère de par leur origine, leurs manifestations, ainsi que des facteurs qui les favorisent.

Le béton armé étant composée de deux parties à savoir le béton et les armatures. Ces derniers remplissent chacun des fonctions différentes mais interdépendantes. Toute pathologie qui affecte l'une d'eux aura des répercussions sur l'autre. C'est ainsi qu'il faut veiller à maintenir l'équilibre entre eux, en décelant très tôt toutes causes de désordres sur l'ouvrage.

La connaissance de ces pathologies est indispensable à l'organisation ultérieure des différents types d'investigations à mener en vue de quantifier l'étendue des désordres et de proposer d'éventuelles réparations.



Partie 2 :

DIAGNOSTIC DES OUVRAGES

Introduction

L'objectif principal du diagnostic est de détecter les pathologies pour y remédier au plus tôt afin de faire un état des lieux et de suivre l'évolution. Cela vise également à prédire la durée de vie d'un ouvrage : à partir du diagnostic (état de santé actuel), de sa cinétique de vieillissement dépendant des caractéristiques intrinsèques du matériau et des agressions possibles résultant des conditions environnementales.

Dans le cas des altérations du béton armé par corrosion, suivant le type d'environnement, il est nécessaire d'évaluer les indicateurs de durabilité usuels que sont la profondeur carbonatée, la teneur en ions chlorures, la porosité du béton, les coefficients de diffusion mais également la profondeur d'enrobage qui constituent les données d'entrée des modèles de prédiction de la durée de vie de l'ouvrage. L'identification des indicateurs de propriétés et de durabilité à évaluer constitue un préambule essentiel à toute opération d'auscultation. Afin de s'inscrire dans une démarche de durabilité, un des indicateurs est de prévoir l'amorçage de la corrosion, c'est-à-dire de déterminer son temps d'initiation.

Dans le cas du béton carbonaté, le suivi du front de carbonatation peut être contrôlé en comparant la position des armatures avec la profondeur du béton carbonaté, soit par une méthode destructive en vérifiant avec de la phénolphthaléine, soit par une méthode non destructive en calculant le temps d'initiation de la corrosion et en utilisant la loi de propagation suivante :

$$t_i = 0,316 \frac{d^2}{D}$$

où t_i représente le temps d'initiation, D le coefficient de diffusion des ions chlorure et d l'épaisseur du béton d'enrobage [Gulikers, 2000].

D'autres moyens d'investigation sont utilisés pour prévoir l'évolution de la corrosion comme le suivi de la vitesse de corrosion ou du potentiel d'électrode.

Dans l'optique d'une réparation ou d'un confortement, le diagnostic a pour but de bien définir les travaux à réaliser. Le traitement des désordres demeurera en effet pérenne puisque ciblé sur leurs origines et leurs conséquences. Cette optimisation des travaux de pérennisation, tant du point de vue qualitatif que quantitatif, est naturellement source d'importantes économies pour le maître d'ouvrage.



2.1 Choix des investigations

Le choix des investigations dépend de :

- **Type de mission à réaliser :**

Diagnostic de maintenance en vue d'éventuelles réparations, diagnostic structure pour un calcul de résistance ou encore évaluation des risques vis-à-vis des biens et des personnes.

- **Nature des matériaux :**

Les matériels et techniques utilisés pour réaliser le diagnostic ne sont pas les mêmes si l'on a à faire à du béton, de l'acier, du bois ou encore de la pierre.

- **Type de structure :**

Géométrie et taille de l'ouvrage

- **Etat de l'ouvrage :**

Les investigations dépendent des désordres qui affectent l'ouvrage. On aura par exemple recours à un matériel particulier en présence de fissures ou d'armatures corrodées dans le béton.

- **Environnement de l'ouvrage :**

L'étude porte également sur l'environnement dans lequel se trouve l'ouvrage car certains désordres y sont parfois directement liés. C'est ainsi fréquemment le cas pour les structures soumises à des attaques chimiques. De plus, les accès limités voire impossibles sur une partie de la structure peuvent être un frein à la réalisation d'investigations et nécessiter l'utilisation de moyens spécifiques.

2.2 Relevé visuel

Le relevé visuel est une étape clé lors de la réalisation d'un diagnostic. C'est un outil indispensable à la compréhension des mécanismes ayant conduit à la formation des désordres. Il consiste à relever de manière exhaustive les désordres affectant l'ouvrage pour aboutir, après dépouillement et analyse, à :

- **Qualifier :**

Un désordre spécifique a une origine et des conséquences particulières. La qualification permet de savoir à quel désordre on est confronté et donc quel type de traitement/réparation est à mettre en place.

- **Localiser :**

La position d'un désordre sur l'ouvrage donne des indications sur son degré d'importance et son origine. En outre, la localisation permet de cibler d'emblée les zones à traiter de manière urgente et de choisir les travaux en fonction des contraintes d'accès.

- **Quantifier :**

Ceci a pour but de connaître l'étendue des désordres et donc d'évaluer les méthodes les plus adaptées pour effectuer les réparations.

Le dépouillement et analyse de ce relevé visuel se fait sur la base de prises de notes et de photographies effectuées sur site. Ce relevé visuel, à la base de tout diagnostic, peut être éventuellement complété par des investigations complémentaires sur site et en laboratoire.

Ces dernières ont pour but de :

- Préciser les désordres observés lors du relevé visuel en améliorant un des éléments du précédemment décrits.



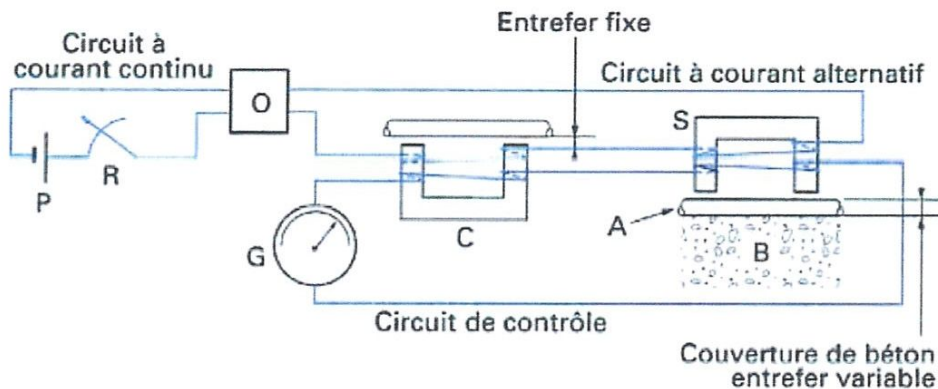
- Recueillir des informations complémentaires sur les matériaux constitutifs et leur état, ou sur la structure.

- Améliorer la connaissance sur le fonctionnement structurel de l'ouvrage.

2.3 Investigations non destructives

2.3.1 Mesures pachométriques (détecteurs d'armatures)

La méthode est basée sur la mesure des perturbations créées par la présence d'un objet métallique placé dans un champ électromagnétique (courant alternatif sinusoïdal ou courant pulsé). Lorsque l'appareil (pachomètre) est situé à l'aplomb d'une armature, il analyse le signal reçu et calcule, selon le type de matériel utilisé, l'enrobage et/ou le diamètre de l'acier.



A armature	O onduleur à transistor
B béton	P pile électrique
C oomparateur	R rhéostat destiné à compenser l'usure des piles
G galvanomètre	S sonde

Fig 2.1 : Schéma de principe du pachomètre

Deux types de mesures peuvent être réalisés :

a) Les fenêtres de détection

Elles consistent à faire une série de mesures verticales et horizontales dans un carré aux dimensions reconnues par l'appareil. Celui-ci est alors capable de synthétiser l'ensemble des données ainsi récoltées pour fournir une cartographie des aciers présents dans la zone du carré.



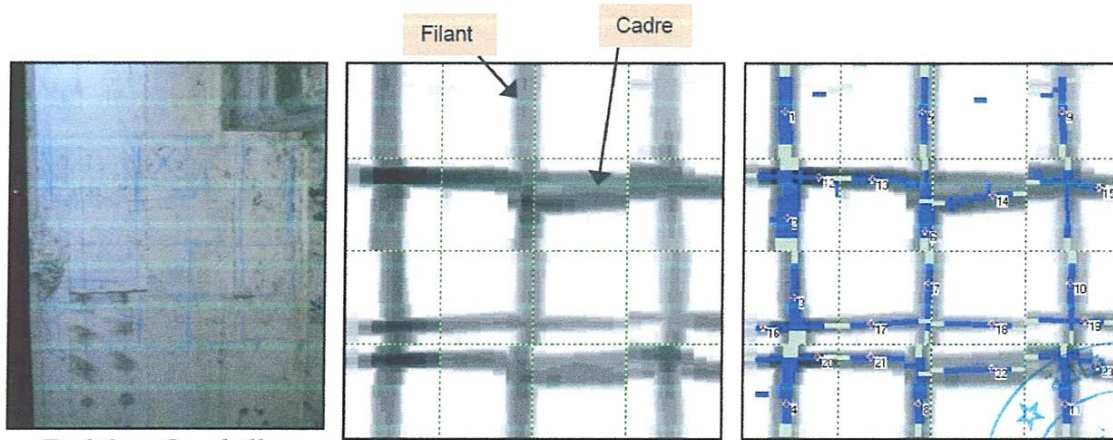
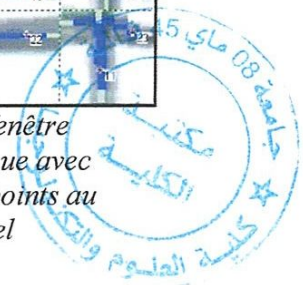


Fig2.2a : Quadrillage avec point

fig 2.2b : Fenêtre pachométrique

fig 2.2c : fenêtré pachométrique avec analyse de points au logiciel



b) Les lignes de détection :

Elles sont réalisées en déplaçant l'appareil de manière continue le long d'un élément de structure. A chaque passage au droit d'une armature perpendiculaire à la direction de déplacement, le capteur détecte la présence d'un acier. Par exemple, lors de l'investigation d'une poutre en béton armé, cette technique permet de déterminer l'espacement des cadres ainsi que leur enrobage.

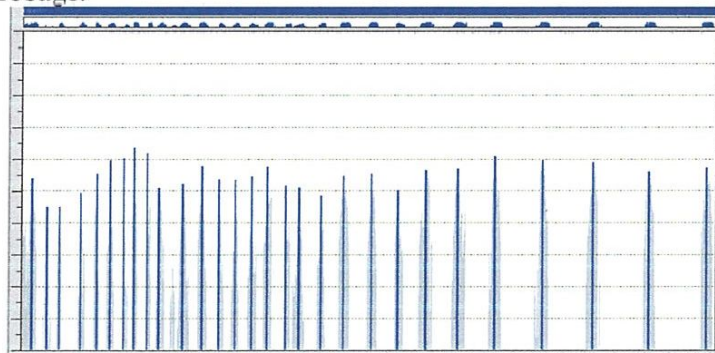


Fig 2.3 : Ligne de détection des cadres dans une poutre en béton armé

Les mesures pachométriques sont utilisées pour déterminer ou vérifier le ferrailage d'un élément en béton armé et ce, de manière non destructive. Dans la pratique, ces mesures sont toujours couplées à un sondage destructif pour étalonnage (validation du diamètre, de l'enrobage) et déterminer la nature de l'acier.

2.3.2 Mesures pour l'évaluation de la probabilité de corrosion des armatures

a) Mesures de potentiel

Parmi les méthodes électrochimiques pouvant être appliquées à la détection du risque de corrosion des armatures dans le béton, les mesures de potentiel sont les plus utilisées et les



plus connues, du fait de leur simplicité et de leur caractère non destructif. Cette méthode permet une évaluation des risques de dépassement des armatures.

Dès le contact de l'armature avec le béton, il s'établit à l'interface acier-béton, une différence de potentiel dépendant à la fois des réactions dites anodiques (oxydations : transformation du métal en oxydes) et des réactions dites cathodiques (réduction de l'oxygène). Ce potentiel est complexe et sa valeur dépend de l'état de corrosion des aciers (le potentiel tend vers des valeurs négatives dès qu'il y a amorce de corrosion), mais aussi de la teneur en eau du béton, de la teneur en éléments agressifs, de la profondeur de carbonatation, de la compacité du béton, etc... Il ne peut être relié à ces facteurs par aucune loi, ni aucune formule mathématique, et la valeur absolue de ce potentiel n'aura donc que peu de signification. Néanmoins, les mesures effectuées sur des surfaces représentatives permettent d'établir une cartographie des probabilités de corrosion et de localiser les zones à risque maximum.

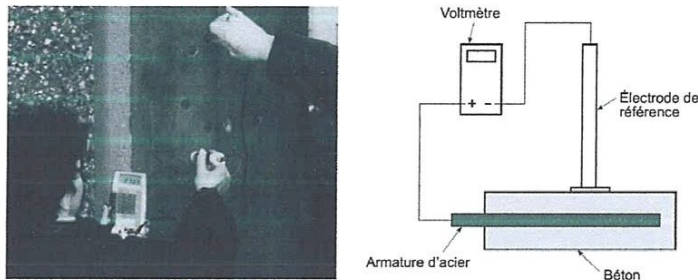


Fig 2.4 : Méthode de détection de la corrosion des armatures

Les mesures de potentiel sont surtout utilisées en phase diagnostic (elles permettent la localisation des prélèvements ou de tests complémentaires), mais également pendant les opérations de réparation (localisation précise des zones à réparer). En surveillance continue, elles permettent également la détection d'un phénomène, bien avant qu'un désordre ne soit visible en surface, et ainsi de mieux planifier les réparations (mesures préventives). Elles ne permettent pas de déterminer la position des armatures (on utilisera pour cela des méthodes magnétiques ou de réflectométrie radar), ni leur vitesse de corrosion (perte d'épaisseur).

Elles ne s'appliquent pas :

- aux éléments enterrés ou immergés, à moins d'adapter la méthodologie à ces cas particuliers (par exemple, mettre hors sol, par affouillement, l'élément de structure),
- au béton revêtu d'un produit électriquement isolant : celui-ci devra être retiré au droit des points de mesure,
- aux armatures actives du béton précontraint, car la présence de la gaine en matière plastique ou métallique, ne permet pas de récupérer le signal correspondant aux câbles. Dans le cas de fils adhérents, par contre, la méthode est applicable.

La méthode nécessite la mise à nu d'une armature, sa connexion à une borne d'un millivoltmètre à haute impédance, dont l'autre borne est reliée à une électrode de référence placée sur le parement.

La jonction entre le béton et l'électrode doit être humide, et si ce n'est pas le cas, cette humidité doit être assurée (pulvérisation d'eau légèrement alcaline, coton imbibé, etc...).

L'électrode de référence est une électrode dont le potentiel est constant, et défini par une suite d'équilibres électrochimiques.



b) Mesures de résistivité

La résistivité électrique du béton caractérise les possibilités de déplacement des particules électriquement chargées. Elle représente la résistance spécifique du matériau au passage d'un courant électrique. On l'exprime en Ohm-mètre ($\Omega.m$).

La corrosion étant un phénomène électrochimique, et le béton étant un conducteur, la résistivité électrique de ce dernier est un paramètre significatif de l'intensité des échanges. Celle-ci dépend toutefois d'un certain nombre de paramètres : teneur en eau du béton, composition chimique de la solution interstitielle (présence de sels), etc...

Les mesures de résistivité sur site sont été utilisées en parallèle avec les mesures de potentiel, pour affiner le diagnostic de la corrosion.

c) La vitesse de corrosion

Cette méthode est basée sur la linéarité des courbes intensité/potentiel au voisinage du potentiel de corrosion libre. La pente de la droite $\Delta E/\Delta I$ exprime la résistance de polarisation R_p , qui est reliée au courant de corrosion par :

$$I_{corr} = B/R_p * A$$

Où **B** est une constante, et **A** la surface concernée par la polarisation. Malgré plusieurs restrictions, d'origine théorique, en mesurant **R_p** périodiquement, il est possible de contrôler l'évolution du processus de corrosion, d'identifier les zones à forte activité corrosive, et de prédire une durée de vie résiduelle pour la structure considérée.

Les appareils permettant ce type de mesure possèdent leur propre système d'étalonnage.



Fig 2.5 : Mesure de vitesse de corrosion

2.3.3 Essai scléromètre (dureté superficielle)

Principe

L'essai au scléromètre est destiné à mesurer la dureté superficielle du béton pour évaluer l'homogénéité surfacique de sa qualité sur un ouvrage.

Il consiste à projeter une masse donnée contre un parement par l'intermédiaire d'un ressort.

Le résultat de l'essai est exprimé par la mesure de distance de rebondissement de la tige. Cette distance est d'autant plus grande que la dureté de surface est élevée.

L'indice sclérométrique I_{sm} est l'indicateur fourni par un scléromètre correspondant à cette distance de rebondissement.



Méthodologie

Des mesures seront réalisées sur des parties de l'ouvrage situées de part et d'autre de la partie auscultée et ayant été coulées avec un béton identique.

La valeur médiane de ces mesures servira de référence pour l'indice sclérométrique auquel seront comparées les valeurs mesurées sur les zones dégradées.

Avantages et limites.

Cet essai est peu coûteux, simple et rapide mais ne peut être utilisé que de manière qualitative sur des bétons anciens, de nombreux paramètres influençant le résultat (carbonatation par exemple). La corrélation empirique entre l'essai sclérométrique et la résistance à la compression du béton n'est alors en effet pas significative.



Fig 2.6 : Mesure au scléromètre

2.3.4 Contrôle magnétique

Cette méthode se base sur les forces magnétiques et ne permet de mettre en évidence que des défauts situés à la surface des matériaux magnétiques. En magnétisant la pièce à contrôler, les lignes de forces sont perturbées à l'endroit de chaque discontinuité dans les propriétés magnétiques (fissure ou inclusion non-magnétique). Les petites particules de fer d'une suspension de limaille de fer (révélateur), répandue sur la surface, se concentrent là où les lignes de forces émergent.

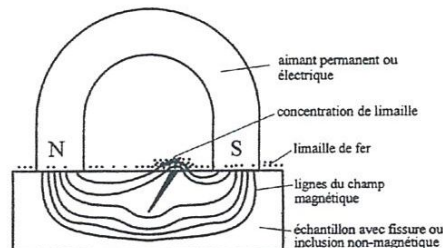


Fig 2.7 : Le contrôle magnétique.

2.3.5 Les techniques acoustiques

Les méthodes acoustiques pour l'auscultation du béton s'appuient sur la propagation d'onde mécanique à des fréquences inférieures à 300 kHz. Les techniques acoustiques utilisées ou à l'étude pour détecter la corrosion dans le béton sont :

- radar
- émission acoustique
- le contrôle par ultrasons

C'est à cette dernière méthode que nous allons nous intéresser le plus.



a) Radar

Le radar est un système générant des ondes électromagnétiques dans une gamme d'hyperfréquences (de l'ordre de quelques MHz à quelques GHz). Les échos sont enregistrés sous forme de traces temporelles.

Ce système est constitué d'une antenne d'émission, d'une antenne de réception, d'un système électronique gérant l'émission et la réception des signaux et d'une unité d'acquisition et de traitement.

Le principe est la transmission d'une impulsion électromagnétique de courte durée à la structure au moyen d'une antenne émettrice.

Cette impulsion électromagnétique de courte durée se propage et se réfléchit sur toute interface présentant un contraste d'impédance électromagnétique.

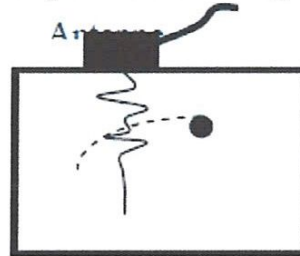


Fig 2.8 : Schéma de principe d'une mesure Radar

Le radar est utilisé pour mesurer des épaisseurs, détecter des vides par exemple sous une dalle, un radier, localiser les armatures et les fissures dans le béton armé ou pour caractériser les matériaux.

L'application de cette méthode nécessite néanmoins un accès direct à la surface de l'ouvrage à ausculter. L'utilisation du radar dans l'évaluation de la corrosion des armatures a démontré qu'il détectait les dommages causés par la corrosion, traduisant ainsi un stade avancé de la corrosion.

Le radar peut prévenir des conditions favorisant l'initiation de la corrosion.

D'autres applications de la technique radar ont été développées comme la caractérisation de certaines propriétés physiques des bétons telles que la teneur en eau et en chlorures, des propriétés électromagnétiques comme la permittivité et la conductivité

b) Émission acoustique

C'est une technique consistant à détecter un événement acoustique et à localiser son lieu d'émission. Ces événements sont générés par une libération brutale d'énergie mécanique pouvant être attribuée, dans le cas du béton, à la fissuration locale du matériau.

Le temps d'arrivée du signal est différent pour chaque capteur, et dépend de la distance entre le capteur et le lieu de la fissuration. En s'appuyant sur ce principe, il est possible en confrontant les temps d'arrivée des signaux et en connaissant la position des capteurs de localiser géométriquement l'événement détecté. Une des orientations actuelles de l'utilisation de l'émission acoustique en génie civil consiste à étudier les corrélations entre la densité d'événements acoustiques et l'activité de corrosion des armatures, de manière à détecter précocement les phénomènes de corrosion.

Le mode de détection des capteurs utilisés en Emission Acoustique (EA) est basé sur l'effet direct de la piézo-électricité.

On mesure donc des quantités de charge qui se traduisent, une fois amplifiées et conditionnées, en un signal transitoire dont l'amplitude s'exprime en dB_{EA}

c) Auscultation ultrasonique

(Cette méthode est décrite en détail dans le troisième chapitre)

2.4 Méthodes destructives

2.4.1 Carottages

Le prélèvement d'échantillon se fait le plus souvent par carottage. Suivant la nature et le type d'analyse, la profondeur et le diamètre des carottes sont adaptés.

Dans la plupart des cas, le carottage se fera dans les espaces (si possible) dépourvus d'armature renseignés par le balayage pachométrique.

La réalisation de carottages dans les structures en béton armé a pour objectif de faire des prélèvements d'échantillons de béton en vue d'analyses pour déterminer :

- Les propriétés mécaniques (résistance à la compression).
- Les caractéristiques physicochimiques (masse volumique apparente, porosité, analyse chimique avec dosage en ciment, pourcentage en chlorures, etc.).
- Les altérations (analyses microstructurelles pour la détermination de pathologies).



Fig 2.9 : Prélèvements par carottage

a) Caractérisation chimique

Les caractéristiques chimiques du béton d'enrobage sont déterminées sur les prélèvements

- Analyse chimique globale : Elle comprend l'analyse de la fraction soluble du résidu insoluble. Elle a pour objet de déterminer les caractéristiques du béton, le dosage en ciment, l'absence d'anomalie ;
- Dosage des chlorures totaux et des chlorures libres (solubles dans l'eau). Les teneurs en chlorures s'expriment par rapport au béton ou par rapport au dosage en ciment. Ce dernier peut être connu ou évalué en laboratoire à partir de la mesure de la silice soluble du ciment préalablement identifiée (dans le dossier chantier ou par examen microscopique). L'interprétation des résultats doit tenir compte non seulement des valeurs absolues mesurées, mais aussi de l'allure des profils de concentration ;



- dosage des sulfates ;
- autres déterminations particulières (par exemple, les sulfures).

b) Caractérisation minéralogique

Les caractéristiques minéralogiques du béton sont déterminées par :

- microscope optique (lumière transmise ou réfléchi) pour la détermination de la nature du ciment, microscopie électronique MEB avec microanalyse élémentaire ;
- diffraction des rayons X pour la recherche et la caractérisation des phases cristallines.

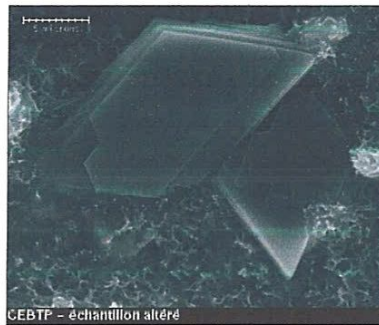


Fig2.10 :Cristal de chloroaluminate

c)Caractérisation physique

Les caractéristiques physiques du béton sont surtout liées à leur résistance à la pénétration (transfert des fluides) :

- porosité à l'eau (éventuellement au mercure) ;
- perméabilité ;
- diffusivité des corps tels que les chlorures ;
- adsorption capillaire ;
- résistance mécanique et éventuellement d'autres caractéristiques.

Limites.

Les échantillons ne sont pas strictement représentatifs des zones les plus saines, ni des zones les plus dégradées. Les échantillons sont choisis, par un inspecteur expérimenté, pour la représentativité des phénomènes de dégradation.

2.4.2 Test à la phénolphtaléine

Ce test est réalisé pour évaluer le caractère basique du béton et sa capacité à protéger les armatures de la corrosion. Etant donné que le pH du béton neuf est proche de 13, on peut alors dire que les armatures du béton armé sont protégées par le caractère alcalin du béton.



Au fil du temps, la pénétration de dioxyde de carbone et de dioxyde de soufre combinés à l'humidité ambiante a pour effet de diminuer le pH du béton. Ce processus appelé « carbonatation » entraîne la diminution progressive du pH dans le béton à partir du parement exposé. Une armature située au-delà du seuil de carbonatation du béton est alors dite « potentiellement corrodée ».

Le test à la phénolphthaléine consiste à projeter sur un éclat frais de béton une solution qui se colore au contact d'un pH proche de celui du béton neuf. On considère alors que les parties colorées ne sont pas carbonatées alors que les parties incolores le sont.

Ce test n'est significatif que si le béton n'a pas subi d'attaques chimiques pouvant perturber la réaction entre la phénolphthaléine et le béton.



Fig2.11 : Test à la phénolphthaléine

Conclusion

Dans cette partie nous avons étudié les moyens utilisés selon le cas pour caractériser les désordres sur une structure. Il s'agissait d'abord de présenter les facteurs qui justifient le choix de méthodes utilisées ensuite présenter un ensemble de techniques d'auscultation. Ces techniques peuvent être non destructives ; dans ce cas les mesures sont effectuées sans faire de dommages physiques sur l'ouvrage ; ou destructives, généralement faites pour affiner le diagnostic. Les techniques non destructives utilisent généralement des procédés électrochimiques, électromécaniques ou électromagnétiques pour caractériser les désordres. Elles donnent souvent des résultats assez satisfaisant mais il convient toujours de prendre des précautions d'emploi ou de les vérifier obtenus par des méthodes destructives afin d'avoir une meilleur vision des désordres.

La synthèse des informations recueillies sur site et en laboratoire ainsi que l'interprétation des données conduisent à la pose d'un diagnostic intégral. Le diagnostic du béton renseigne :

- la nature des processus en cours
- l'intensité de la pathologie
- l'évolution probable des dégradations

Le diagnostic fait l'objet d'un rapport détaillé et abondamment illustré.

L'objectif ultime du diagnostic est de proposer en connaissance un avis sur les principes qui doivent guider le gestionnaire d'ouvrage ou le bureau d'étude dans son choix de méthode de protection et de réparation des structures en béton.



Partie 3 :

**CONTROLE NON DESTRUCTIF PAR
LES ULTRASONS**

Introduction

Les ultrasons sont des ondes mécaniques générées à partir d'un élément piézo-électrique excité à une fréquence comprise pour de nombreuses applications entre 2 et 5 MHz. Cet élément est souvent fixé d'un côté sur une semelle en matière plastique et de l'autre à un amortisseur, l'ensemble constituant le transducteur.

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'une onde ultrasonore se propageant dans l'élément à contrôler. Le train d'onde émis par le transducteur émetteur se réfléchit dans le fond de la pièce et lorsque les ultrasons rencontrent un défaut favorablement orienté par rapport à l'onde incidente, un écho revient vers le transducteur récepteur.

Cette énergie mécanique réfléchie est transformée en signal électrique par l'élément piézoélectrique et se signale par un écho sur le système de visualisation de l'appareil à ultrasons.

D'un point de vue pratique, on utilise un écran d'oscilloscope. Les échos sont représentés par des pics sur l'écran. La position de l'écho permet de déterminer la profondeur à laquelle se trouve l'inclusion dans la pièce et d'en apprécier le caractère volumique ou non.

La mesure de la vitesse d'ondes ultrasonores dans le béton est classiquement utilisée aussi bien en laboratoire que sur les ouvrages.

Suivant la position du récepteur en mode transmission ou réflexion, cela permet d'avoir des informations sur les couches superficielles du béton dégradé, de connaître la mesure d'épaisseur du béton par exemple et de rechercher des défauts comme la corrosion de l'acier.

L'auscultation par ondes ultrasonores permet de contrôler la qualité du béton afin de détecter des zones de différentes natures, de détecter et dimensionner des défauts et d'estimer la résistance à la compression du béton. Elle peut également être utilisée pour déterminer les modules d'élasticité ou les coefficients de poisson des structures.

Elle est inscrite dans normes de plusieurs pays.

3.1 Les types d'ondes ultrasonores

Les ondes ultrasonores sont des ondes élastiques dont les fréquences sont comprises entre 20kHz et quelques centaines de Méga Hz.

Il existe deux types d'ondes ultrasonores fondamentales, mais leur mode de propagation permet de les identifier.

a) Les ondes longitudinales

Les ondes longitudinales sont aussi appelées ondes de compression. Elles se caractérisent par un déplacement des particules parallèle à la direction de propagation. Le passage d'une onde longitudinale plane entraîne une variation de la distance entre les plans parallèles contenant les particules. Ceci entraîne une augmentation du volume occupé par les particules.

Le champ de déplacement des ondes longitudinales se décrit comme :

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



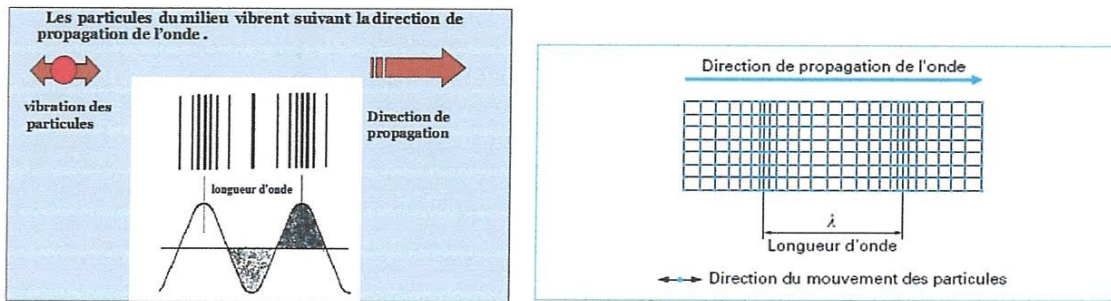


Fig 3.1 : Ondes ultrasonores longitudinales

La vitesse des ondes longitudinales est liée aux caractéristiques des matériaux par la relation suivante :

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

Avec

E : module de Young (Pa)

ν : Coefficient de poisson (sans dimension)

ρ : Masse volumique (Kg/m³)

b) Les ondes transversales

Les ondes transversales ou ondes de cisaillement, se propagent dans une direction perpendiculaire à celle de la vibration (au vecteur d'onde). Le glissement des plans parallèles ne donne lieu à aucune variation de volume.

Ces ondes ne peuvent exister que dans les solides car leur existence est liée à une résistance au cisaillement que ne possèdent ni les liquides ni les gaz.

Le champ de déplacement pour une onde transversale (cisaillement).

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



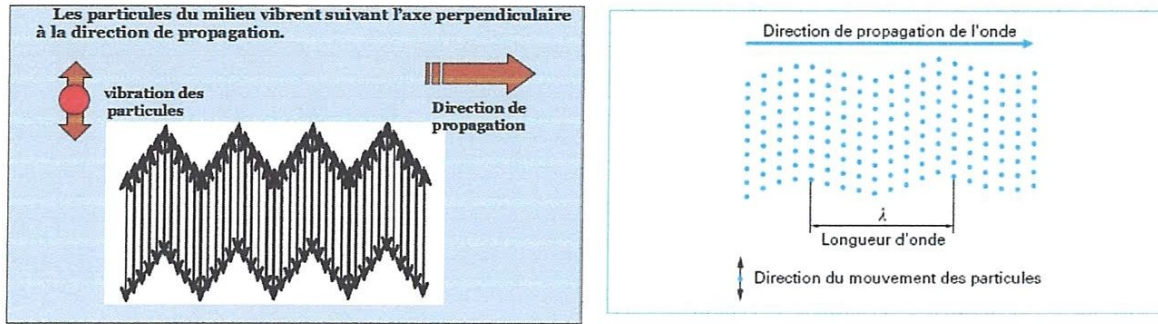


Fig 3.2 :Ondes ultrasonores transversales (cisaillement)

De même, la vitesse des ondes ultrasonores transversales V_T est liée aux caractéristiques du matériau par la relation :

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1-\nu)}}$$

REMARQUE :

* Dans les solides élastiques on a les deux types d'ondes (longitudinales et transversales). Dans ce cas le mouvement des particules peut-être divisé en trois composantes perpendiculaires (une longitudinale et deux transversales pour une même direction de propagation).

* Pour les matériaux anisotropes (corps dont les propriétés varient selon la direction), aucune des trois ondes n'a sa polarisation perpendiculaire ou colinéaire à son vecteur d'onde. L'onde qui a le vecteur d'onde le plus proche de la direction de propagation est appelé **onde quasi-longitudinale** et les deux autres sont appelées **ondes quasi-transversales**. L'onde quasi-longitudinale a toujours une vitesse supérieure aux deux autres.

* Pour les matériaux isotropes, l'onde longitudinale sera toujours parallèle à la direction de propagation. De plus, l'isotropie rend les ondes transversales indissociables et égales, avec les mêmes vitesses, lesquelles seront toujours inférieures à la vitesse de l'onde longitudinale.

c) Combinaison des deux types d'ondes : Ondes de surfaces

Les ondes de surface (principalement les ondes de Rayleigh) sont une combinaison particulière des ondes de volume de compression et de cisaillement de même fréquence déphasée de $\pi/2$, qui se forme au voisinage des surfaces libres des matériaux. Le mouvement des particules est elliptique. Elles intéressent une faible épaisseur du matériau au voisinage de la surface libre, de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, et présentent une très grande sensibilité à toute discontinuité de surface, quelle que soit son orientation. Cela en fait un outil idéal pour l'étude des bétons d'enrobage.

Le champ de déplacement pour une onde de Rayleigh peut être décrit par:

$$U_1 = U_1(x_1, t) \quad U_2 = 0 \quad U_3 = U_1(x_3, t)$$



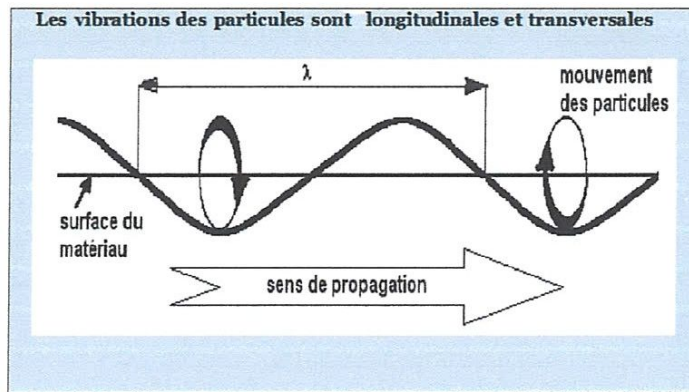


Fig 3.3: Ondes de Rayleigh (surface)

Les ondes de surface sont liées aux propriétés du matériau par une relation déduite de celle des ondes longitudinales et transversales :

$$V = \sqrt{\frac{E(0.87 + 1.12\nu)}{\rho(1 - \nu)\sqrt{2(1 + \nu)}}$$

D'où $V_R \approx 0.9 V_T$

Remarque :

En cas de l'état de contrainte homogène, les ondes de Rayleigh sont non dispersives c'est-à-dire que la vitesse de l'onde ne change pas avec le changement de la fréquence. Une onde de Rayleigh se propage dans la direction x_1 et est atténuée exponentiellement dans la direction x_3 .

d) Les ondes de plaques ou ondes de Lamb

Les ondes de plaques ou ondes de Lamb correspondent à des ondes de surface qui se propagent dans des matériaux dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Dans ce cas, l'onde vibratoire intéresse toute l'épaisseur de la plaque. Il existe alors une infinité de modes de vibration dépendant du nombre de nœuds et de ventres présents dans l'épaisseur. On distingue deux grandes familles d'ondes de Lamb, suivant que la plaque vibre en conservant un plan de symétrie (modes symétriques ou de compression S) ou non (modes antisymétriques ou de flexion A). Ces ondes contrairement aux précédentes, sont dispersives : leur vitesse dépend de la fréquence f , de plus, la vitesse de propagation du front d'onde (vitesse de phase) est différente de la vitesse de propagation de l'impulsion énergétique donnée par l'émetteur (vitesse de groupe).

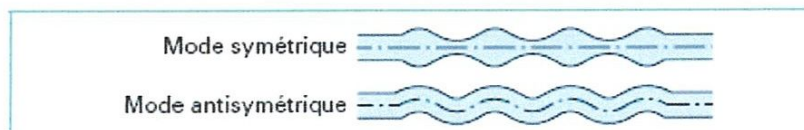


Fig 3.4 : Ondes de Lamb



3.2 Propagation des ondes ultrasonores

La propagation des ondes ultrasonores est utilisée comme base de technique non destructive de contrôle des matériaux et de suivi de leur endommagement. Elle est directement liée aux propriétés mécaniques du matériau (E, ν), permet d'apprécier l'homogénéité du milieu ausculté (en détectant les fissures, les vides, et délaminages), de caractériser un béton dont le rapport E/C est incorrect, ou ayant subi une modification structurelle (cas des bétons gelés ou incendiés).

3.2.1 Propagations d'ondes en milieu hétérogène

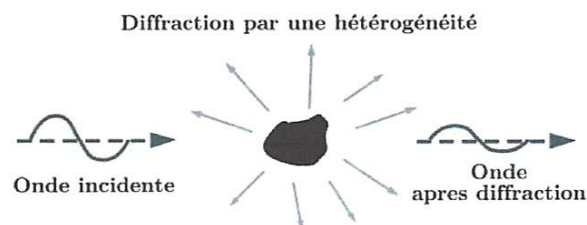
La caractérisation non destructive des milieux hétérogène joue un rôle primordial dans la pérennisation des structures du génie civil. L'estimation de leur potentiel de vie restant, permettrait d'améliorer la qualité et la sécurité et de prolonger leur conformité. Elle donnerait accès à des méthodes de prédiction des risque et donc à une meilleure gestion des investigations. Il est de ce fait important de mettre en œuvre des techniques performantes et adaptées au contrôle des structures.

Les ondes ultrasonores qui 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. Ce sont les granulats, les grains de sables, les fissures et les microfissures voire les barres de renfort. Les vitesses et atténuation évoluent alors et ceci notamment en fonction de la fréquence. L'endommagement ou l'évolution de certains pathologies peuvent modifier la distribution, la forme et la densité de ces diffuseurs. Il convient alors de mesurer ou de prédire leurs influences sur les paramètres acoustiques.

a) Diffraction des ondes par l'hétérogénéité

La diffraction est un phénomène ondulatoire dans lequel une onde se disperse en passant au bord d'un solide ou en traversant une fente droite au lieu de continuer tout droit.

Lorsqu'une onde interagit avec une hétérogénéité du matériau, elle subit de la diffraction. Une partie de son énergie est déviée et redistribuées dans tout l'espace. L'onde qui se propage dans la même direction que l'onde incidente après diffraction par l'hétérogénéité a donc une amplitude plus faible. Cet effet de diffraction est plus ou moins marqué suivant la fréquence de l'onde 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.



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



Fig 3.5 : Diffraction multiple des ondes par l'hétérogénéité

b) Champ cohérent et incohérent.

On distingue dans le champ ayant subi de la diffusion multiple une partie cohérente, qui résiste à une moyenne sur plusieurs réalisations du désordre (c'est-à-dire plusieurs configurations de diffuseurs différents statistiquement équivalentes (Foldy 1945)

Et une partie incohérente qui est propre à une réalisation du désordre particulière.

Un champ Φ représentant une réalisation particulière du désordre pourra être décomposé de la manière suivante :

$$\Phi = (\Phi) + \Phi_{\text{incohérent}}$$

Le champ cohérent décrit une onde s'étant propagée dans un milieu homogène équivalent, appelé également milieu effectif. La partie incohérente est composée de trains d'ondes ayant parcouru un chemin plus ou moins tortueux dans le matériau en fonction des différents événements de diffusion rencontrés. Sur deux configurations différentes du désordre, ces champs ne sont pas en phase puisqu'ils ont subi des événements de diffusion différents. La moyenne sur le désordre annule ces signaux déphasés et ne conserve que les signaux en phase de la partie cohérente.

Au cours de la propagation, les effets de la diffraction par les hétérogénéités transfèrent progressivement l'énergie du champ cohérent vers le champ incohérent. L'amplitude du champ cohérent décroît donc au cours de la propagation, entraînant une atténuation apparente supplémentaire. Les ondes cohérentes sont les plus étudiées dans l'évaluation des matériaux hétérogènes car elles contiennent des informations de vitesse et d'amortissement similaires à celles mesurables sur des milieux homogènes. De nombreuses théories permettent de décrire ces ondes cohérentes principalement basées sur la définition d'un milieu homogène équivalent. Les ondes incohérentes sont généralement traitées comme du bruit.



3.2.2 L'atténuation

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

Elle peut être causée par trois phénomènes : la diffusion, la dispersion et la dissipation.

La diffusion

La diffusion est un processus dans lequel un changement de direction ou d'énergie d'une particule incidente est provoqué par la collision de cette particule avec une autre particule ou un système de particule. Dans le cas du béton, elle est principalement attribuée aux multiples diffractions de l'onde sur les défauts (microstructure, répartition des granulats) et aussi à l'humidité.

La dispersion

La dispersion correspond à la décomposition d'une onde de volume et de surface causée par la variation des propriétés physiques du milieu de propagation (par exemple la vitesse de phase), en fonction de la fréquence.

La dissipation

La dissipation se traduit par la transformation d'énergie rayonnante en une autre forme d'énergie par interaction avec la matière. Elle est liée à deux propriétés intrinsèques du matériau :

- l'inélasticité de la matrice ou des défauts. L'atténuation provoquée par cette propriété du matériau est linéaire, [Kim et al. 1991];
- le frottement de grains à grains. Cette forme d'atténuation est non linéaire.

L'atténuation est donc obtenue par la somme des différentes composantes d'atténuation.

Elle est définie par la formule suivante :

$$\alpha = \alpha_{\text{absorp}} + \alpha_{\text{diverg}} + \alpha_{\text{diffus}}$$

Dans le cas du béton le phénomène de diffusion est le plus important et constitue la cause principale de l'atténuation de l'onde.

Suivant 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 $\lambda \approx d$ et géométrique pour $\lambda \ll d$. Le cas du béton avec des longueurs d'ondes utilisées de l'ordre de 100 mm à moins de 5 mm pour des fréquences de moins de l'ordre de 20 kHz à plus de 1



MHz se situe dans le domaine stochastique pour lequel les phénomènes de diffusion sont importants. Dans cette zone l'atténuation est proportionnelle au carré de la fréquence et s'écrit :

$$\alpha_{diffus} = B_2 \bar{d} \mu^2 f^2$$

Avec f la fréquence, B_2 est un coefficient qui prend en considération la vitesse de phase des ondes ultrasonores, μ est un facteur qui fait intervenir les constantes d'élasticité et T est le volume moyen pondéré des grains dans le matériau. Le produit $B\mu$ est un facteur de diffusion.

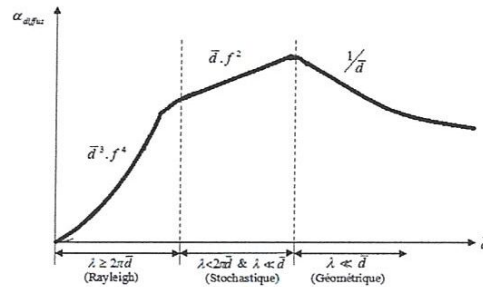


Fig 3.6 : Atténuation en fonction des 3 domaines fréquentiels

Plusieurs études ont été menées pour la détermination du coefficient d'atténuation de l'onde. Celles-ci ont permis d'obtenir différentes méthodes qui prennent en compte l'influence de paramètres comme la fréquence, diamètre des granulats... etc.

- D'après Kim et al les matériaux peuvent être classés par ordre d'atténuation des ondes de volume pour des fréquences variant entre 0 et 18MHz. Le béton possède un coefficient d'atténuation de l'ordre de 2 %.
- Selon Gaydecki et al., le coefficient d'atténuation total du signal, dans le béton, dépend principalement de la fréquence, et du diamètre des granulats.

Dans le cas où la longueur d'onde est supérieure au diamètre des plus gros granulats, l'expression du coefficient d'atténuation total α en fonction de la fréquence est la suivante :

$$\alpha(f) = a_1 + aD^3 f^4$$

a_1 coefficient dissipation

a coefficient de dispersion

f fréquence (Hz)

D diamètre moyen des granulats (m)

Si le diamètre des plus gros granulats est proche de la longueur d'onde, alors l'expression de α change.

$$\alpha(f) = a_1 + aD^2 f^2$$

L'amplitude A_x à une distance x de la source et pour une onde, est donnée par :



$$A_x = \frac{A_0}{x} e^{(-\alpha x)}$$

Avec A_0 amplitude initiale de l'onde

3.2.3 Influence du milieu

Suivant le milieu dans lequel se trouvent les ondes, leur propagation sera différente. Dans le cas du Génie Civil, la porosité du béton est un paramètre déterminant sur la vitesse de propagation des ondes. La taille des granulats et les différentes interfaces entre la pâte de ciment et les granulats et l'armature ont également une influence.

a) Influence de la porosité

L'influence de la porosité du béton sur la propagation ultrasonore peut être mise en évidence par différentes expériences. L'une d'entre elles consiste à étudier des échantillons de ciment ou de mortier contenant uniquement du sable, pour affranchir des effets causés par la présence de dimension plus importantes.

✚ Porosité artificielle

Des adjuvants du béton appelés « entraîneurs d'air » permettent d'augmenter artificiellement la porosité de la pâte de ciment. Ces adjuvants ont été utilisés par Punurai et al. (2006), générant ainsi 10% de pores de 1mm de diamètre dans les blocs de ciment. Chaix et al ont remplacé de tels pores par des billes de polyester de 1 à 2mm de diamètres dans du mortier. Les résultats montrent une très nette augmentation du facteur d'amortissement des ondes de compression. Cette effet est d'autant plus important que la fréquence est élevée (supérieure à 500 khz). Par ailleurs, la vitesse des ondes de compression diminue fortement avec la présence des bulles d'air.

✚ Rapport E/C

La porosité des pâtes de ciment dépend directement du rapport E/C utilisé dans la formulation. La dimension des pores est en générale beaucoup plus petite que dans le cas d'une porosité artificielle et la porosité peut varier de 10 à 18 %.

A haute fréquence (supérieure à 1,5MHz), sur des blocs de ciment ou de mortier dont le rapport E/C varie de 0,45 à 0,65, des mesures des ondes de compression montrent que le rapport E/C influe fortement sur le facteur d'amortissement [Vergara et al, 2001]. Par contre, des mesures similaires à plus basses fréquences (inférieure à 800 KHz) montre que les variations du facteur d'amortissement en fonction du rapport E/C sont plus faibles. Quelle que soit la fréquence considérée, les mesures de vitesse des ondes de compression montrent une très forte sensibilité avec le rapport E/C.

Que ce soit sur du ciment, du mortier, ou du béton, des variations du rapport E/C influent fortement sur les valeurs de vitesse. Les variations du facteur d'amortissement sont importantes pour les plus hautes fréquences, mais sont relativement faibles en dessous de



1MHz, la précision de l'estimation de ces facteurs d'amortissement doit donc être très grande, ce qui est rendu d'autant plus difficile par la présence des granulats.

Microfissures

La présence de microfissures dans le mortier est étudiée par Aggelis and Shiotani en introduisant des petites plaquettes de vinyle de différentes dimensions et de différentes concentrations. Les résultats ont montré qu'une augmentation de la concentration d'inclusions augmente considérablement les valeurs de vitesses de phase et de l'atténuation pour des fréquences inférieures à 300 KHz. Les mesures de vitesses montrent que les ondes de Rayleigh sont beaucoup plus sensibles que les ondes de compression à ce type d'hétérogénéité, les auteurs attribuent cet effet au fait que le mouvement particulaire associé à l'onde de Rayleigh étant elliptique, ces ondes sont plus sensibles à des fissures ou plaquettes orientées dans toutes les directions, tandis qu'une onde purement de compression sera moins influencée par une plaquette ou fissure orientée suivant sa direction de propagation.

Taux de saturation

La teneur en eau du béton repente le taux volumique d'eau libre dans le matériau, elle peut être comprise entre 4 et 14 %. On peut également l'expliquer en terme de taux de saturation du béton, compris alors entre 0 (matériau sec) et 100% (complètement saturé), bien que ces valeurs extrêmes ne soient jamais atteintes en pratique. Ce taux de saturation influe sur la vitesse de propagation des ondes dans le béton (Ohdara and Masuyama, 2000). Cette influence est aussi démontré par Villain et al, 2008. Ces études montrent que la variation des vitesses de phase avec la teneur en eau est importante et ne varie pas linéairement avec le taux de saturation.

b) Influence des inclusions rocheuses

Sables

Owino and Jacob ont tenté de quantifier les effets de l'absorption et de la diffusion par les sables sur l'amortissement des ondes de Rayleigh (200-1200 KHz) dans du mortier, Leur conclusion est que dans le mortier, les pertes par diffraction sur les grains de sables ($D=1$ à 3 mm) sont négligeables par rapport à l'amortissement intrinsèque, l'amortissement mesuré étant principalement linéaire avec la fréquence.

Chaix(2003) étudie dans sa thèse l'influence du taux de sable et des dimensions des grains dans du ciment ($D=1$ à 8 mm), dans la bande fréquentielle 250 – 1250 KHz. L'ajout de sable dans le ciment provoque une augmentation des valeurs de vitesse et d'atténuation mesurées pour les ondes P. Entre les mortiers contenant différents taux et différentes dimensions de grains de sable, les différences ne sont visible sur l'atténuation que pour les fréquences les plus élevées (supérieur à 800). Les valeurs de vitesses sont très sensibles au taux d'inclusion pour toutes les fréquences mais assez peu aux dimensions des inclusions.



Gros granulats

Dans le cas de granulats de dimensions plus importantes, l'évaluation de l'atténuation devient plus délicate dans la même bande de fréquence. Dans les travaux menés par Landis and Shah(1995), les courbes d'atténuation des ondes P pour du béton ($D_{\max}=10\text{mm}$) semble relativement uniforme avec la fréquence, jusqu'à une fréquence limite qui diminue à mesure que D_{\max} augmente. Au-delà de cette fréquence limite, l'atténuation présente un saut important et à un comportement fréquentiel erratique (qui est irrégulier) : la dimension des hétérogénéités devient comparable à la longueur d'onde et les effets de la diffusion multiple deviennent alors très importants, le comportement des courbes d'amortissement reflète le caractère aléatoire de configuration d'hétérogénéité rencontrée au cours de la propagation.

Dans le cas de bétons ayant de granulats plus gros ($D_{\max}=37\text{mm}$) la différence d'atténuation des ondes P avec le mortier ($D_{\max}=4,5\text{mm}$) est relativement faible pour des fréquences inférieurs à 100kHz et augmente progressivement avec la fréquence [Philippidis and Aggelis,2005]. Cet écart est d'autant plus important et survient d'autant plus basse fréquence que le rapport E/C est élevé. Ces effets sont attribués à l'existence d'une zone interfaciale entre les granulats et la pâte de ciment.

La vitesse de phase mesurée sur le béton est plus élevée que celle mesurée sur le mortier quelle que soit la fréquence considérée.

c) Influence du ferrailage

O.Paris et al . ont démontré influence du ferrailage sur les mesures de détection de fissures par ultrasons en effectuant une étude expérimentale réalisée avec un réseau des capteurs basse fréquence sur une maquette de béton ferrillée représentative des premières épaisseurs du béton d'enceinte. Cette étude démontre que malgré la présence du ferrailage, des défauts localisés jusqu'à des profondeurs de 500mm peuvent être détectés. Néanmoins, on observe qu'une nappe de ferrailage peut diminuer, l'amplitude de détection de défauts profonds selon l'orientation des défauts (perte de 3 dB à 400mm pour un défaut de 15°).

d) Influence de contraintes mécaniques

La plus part des parties d'ouvrages auscultées sont sous contrainte mécanique. Il peut s'agir de parties soumis à des contraintes de compression ou de flexion. Peu de travaux ont été menés sur l'influence de l'état de contrainte sur la propagation des ondes ultrasonores dans le béton

Le caractère hétérogène du béton rend l'exploitation des signaux ultrasonores difficile et les mesures réalisées pour l'instant dans des bétons sous contraintes mécaniques de compression n'ont pas mis en évidence un comportement acousto-élastique. Cependant ces mesures de vitesse n'ont été effectuées que très rarement dans la direction de chargement et souvent pour un seul type d'onde, les ondes longitudinales.

Des études sur l'influence des contraintes mécaniques en utilisant les ondes longitudinales et transversales ont été menées par Chaix et al.Le principe de la mesure consiste à faire des mesures de vitesses ultrasonores longitudinales et transversales sur des éprouvettes soumis à des contraintes de compression uni-axiale. Les résultats obtenus ont montré clairement que la vitesse ultrasonore varie en fonction de la contrainte uni-axiale appliquée au béton. Les ondes



les plus sensibles à cette contrainte sont les ondes longitudinales et les ondes transversales polarisées dans la direction de chargement.

3.3 L'appareil à ultrasons

3.3.1 Description

Il existe un dispositif commun aux mesures soniques in situ et aux essais de laboratoire. Il est constitué :

- D'un ensemble émetteur- récepteur d'ultrasons couplé physiquement à la structure en béton.
- D'un boîtier électrique de conditionnement et de traitement de signal.
- D'un oscilloscope pour visualiser et analyser les signaux reçus.
- D'une unité de stockage du signal.
- D'un micro-ordinateur et de logiciels usuels de traitements de données (statiques et graphiques)

Il existe aussi des appareils similaires qui n'exploitent pas l'amplitude de l'onde et qui ne possèdent pas de sortie signal. La lecture du temps se fait sur afficheur numériques et dans les meilleurs cas via un traitement automatisé du signal.



Fig 3.7 : Ausculteur-ultrasonique

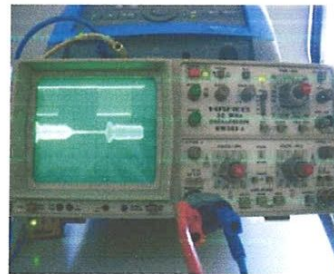


fig 3.8 : oscilloscope

3.3.2 Effet piézoélectrique

La grande majorité des palpeurs ultrasonores utilisés pour le contrôle non destructif sont des transducteurs piézoélectriques. La piézoélectricité, découverte en 1880, est la propriété réversible de certains matériaux de se déformer sous l'action d'un champ électrique. Cet effet piézoélectrique, caractérisé par les paramètres g (constante de pression) et K (facteur de couplage) est minime pour les cristaux naturels comme le quartz. Il est beaucoup plus important dans certains matériaux comme les céramiques piézoélectriques de synthèse, dont les plus utilisées sont le titanate de baryum, le titanate – zirconate de Plomb (PZT) et le métaniobate de plomb. On accroît considérablement l'effet piézoélectrique vibratoire en excitant le cristal sur un mode de résonance mécanique. Cela revient à utiliser une lame piézoélectrique d'épaisseur a telle que

$$f_0 = \frac{v}{2a}$$

f_0 : fréquence fondamentale de vibration,
 v : vitesse du son dans le matériau



3.3.3 Palpeurs piézoélectriques

En règle générale, un palpeur est constitué autour d'une pastille piézoélectrique circulaire ou rectangulaire taillée dans le matériau piézoélectrique choisi, dont les faces parallèles sont métallisées de façon à réaliser deux électrodes auxquelles sont soudés les fils de connexion. Pour limiter les vibrations vers l'arrière du palpeur et leur durée, la pastille est placée sur un bloc amortisseur réalisé en matériau dense et très absorbant (par exemple, métal lourd ou sel métallique noyé dans une résine). L'ensemble de ces deux éléments et une bobine d'accord sont placés dans un boîtier métallique complété par un connecteur électrique et une face de protection devant la pastille piézoélectrique. Cette face avant joue le double rôle de protection contre les chocs mécaniques et d'étanchéité. Elle est réalisée dans des matériaux très variés (résines, carbures non métalliques...). L'épaisseur de cette face de protection n'a pas d'influence sur l'énergie transmise si elle est un multiple entier de la demi-longueur d'onde dans ce matériau.

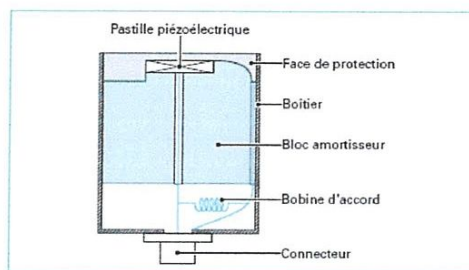


Fig 3.9 : Structure d'un palpeur ultrasonore

- Il existe plusieurs familles de palpeurs piézoélectriques : les palpeurs émetteurs – récepteur et les palpeurs avec émission et réception séparées. Les palpeurs les plus utilisés dans le domaine du contrôle non destructif sont les palpeurs droits cylindriques.

La précision des sondages dépend beaucoup du choix de la sonde et en particulier de sa fréquence de résonance. Sa valeur est d'habitude indiquée sur le boîtier du palpeur. Ses caractéristiques principales sont la sensibilité et son pouvoir de résolution.

- La sensibilité est le rapport entre l'intensité de l'écho pour un défaut de taille donnée (étant donné un contact parfait à l'interface) et l'intensité d'émission.
- Le pouvoir de résolution est défini comme la finesse des impulsions ou encore par la distance minimum entre deux défauts qui peuvent encore être distingués.

Les sondes à basse fréquence (0,5 - 1 MHz) ont les caractéristiques suivantes:

- une faible sensibilité pour les petits défauts (λ trop grand)
- un manque de sensibilité en proximité de la surface sous le capteur.

Les sondes à haute fréquence (2 - 6 MHz) ont les caractéristiques suivantes:

- une bonne sensibilité pour les petits défauts
- un bon pouvoir de résolution
- le faisceau sonore est concentré et de ce fait indique précisément la position du défaut.

3.4 Principe de la mesure par ultrasons

La méthode consiste à mesurer la vitesse de propagation d'ultrasons traversant le matériau à l'aide d'un générateur d'ondes et d'un récepteur. L'analyse de l'énergie ultrasonore transmise à travers la pièce à contrôler, et réfléchiée par des discontinuités internes, constitue la base de la méthode. Le temps de propagation de l'impulsion dans le béton est mesuré par des circuits



de mesure électroniques. Les essais peuvent être effectués sur des éprouvettes en laboratoire ou sur ouvrage.

Elle permet d'évaluer :

- l'homogénéité du matériau béton
- la qualité mécanique du béton en effectuant une corrélation entre les mesures de vitesse du son et les résultats d'essai à la compression.
- la profondeur d'une couche de béton altérée en surface
- De la profondeur d'une fissure

La vitesse sonique des ondes longitudinales est en relation avec le module d'élasticité et la résistance à la compression après étalonnage.

L'atténuation donne un complément d'information estimatif sur la cohésion, la compacité ainsi que sur l'hygrométrie du milieu de propagation. Sa mesure et son exploitation sont complexes du fait du grand nombre de paramètres qui entrent en jeu (température, humidité, qualité de l'état de surface et du couplage des transducteurs)

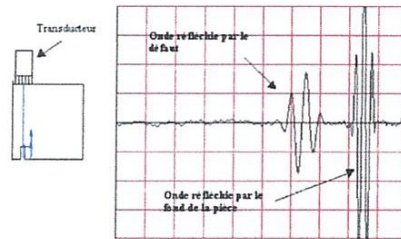


Fig 3.10 : Principe de la mesure par ultrasons

3.4.1 Détermination de la vitesse de propagation de l'onde

Les caractéristiques recherchées dans le cas de mesures ultrasoniques sont le temps de parcours de l'onde, ainsi que des variations du signal (amortissement de l'amplitude) entre l'émetteur et le récepteur, on peut tirer des informations sur la présence de cavités et, dans une certaine mesure, sur le module d'élasticité et la résistance.

Après une distance de parcours L et un temps de propagation t dans le matériau elle atteint un second transducteur électro-acoustique qui va convertir l'onde en un signal électrique. On peut ainsi déterminer la vitesse de propagation de l'onde sonore dans le matériau :

$$V=L/t$$

Cependant certaines mesures doivent être prises pour avoir des résultats qui reflètent l'état réel de l'échantillon :

- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, et une substance de contact telle une mince couche d'huile est indispensable.
- Le parcours doit être préférablement d'au moins 30 cm de façon à prévenir toute erreur occasionnée par l'hétérogénéité du béton.
- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.



- La présence d'acier d'armature dans le béton a un effet appréciable sur la vitesse des impulsions. Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

a) Variation de la vitesse dans un matériau

L'auscultation ultrasonique permet de localiser des défauts, des vides ou toutes autres malfaçons dans le matériau. Cette méthode est basée sur la très faible transmission de l'énergie des ultrasons au travers d'une lame d'air emprisonnée dans le matériau. Si la surface de vide rempli d'air est supérieure à la surface de contact entre le transducteur et le béton, la première impulsion captée par le transducteur de réception sera diffractée autour de la zone défectueuse et le temps de propagation sera plus long que dans un matériau homogène.

✚ Influence du diamètre des transducteurs

Il est à noter aussi que la résolution ne peut pas être inférieure à la moitié de la longueur d'onde dans le milieu. Une étude sur l'estimation de la porosité menée au laboratoire de LGCH de Guelma (Bénouis et al) avec deux types de transducteurs de même fréquence (54 kHz) et de différents diamètres ($d = 7.5$ mm et $D = 49.5$ mm), avec des ondes longitudinales (transmission directe) ; a permis de mettre en évidence l'effet du diamètre des transducteurs. Il est apparu que les vitesses déterminées par les transducteurs « D » sont toujours supérieures à celles déterminées par les transducteurs « d » et que la divergence du faisceau dans le cas du petit transducteur est quatre fois supérieure à celle du gros transducteur. D'où une meilleure précision et une moindre perturbation des mesures par les transducteurs de diamètre D.

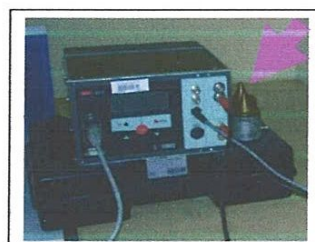


Fig 3.11 : Dispositif de mesure des ultrasons et transducteurs utilisés

3.4.2 Méthodes de mesure

La méthodologie à utiliser dépend des normes en vigueur dans le pays concerné ; du choix des méthodes et des modes opératoires.

Il existe trois méthodes de mesures. Ces méthodes dépendent de l'accessibilité de la partie de l'ouvrage à ausculter, des indications de la norme en vigueur, et des paramètres à déterminer.

- La méthode directe (Méthode de mesure en transparence)
- La méthode semi-directe (Méthode de mesure en semi-transparence)
- La méthode indirecte (méthode de mesure en surface)

Toutes ces méthodes permettent d'ausculter des dimensions variant de 0,6 à 2m voir plus.



a) Mesure en transparence (méthode directe)

Ce sont des mesures unitaires ponctuelles par transparence avec émetteur et récepteur en vis-à-vis, sur chacun des faces de la structure. Cette méthode s'applique sur une partie d'ouvrage présentant deux faces disponibles ou sur des carottes en laboratoire.

Cette méthode permet de :

- Mettre en évidence des défauts d'homogénéité
- Estimer le module d'élasticité
- Estimer la résistance à la compression.

✚ Principe

Le principe de la mesure en transparence directe consiste à déterminer le temps de propagation des ondes sonores longitudinales à travers un élément.

L'émetteur et le récepteur sont appliqués sur les 2 faces opposées de l'élément à mesurer. Le récepteur transforme les trains d'ondes mécaniques en signaux électriques visualisés sur le tube cathodique d'un oscilloscope; le balayage de ce dernier étant synchronisé par le signal d'émission, la lecture du temps de propagation des ondes dans le matériau se fait sur un vernier.

Le contact parfait des sondes avec la surface de l'élément est assuré par un produit spécial (par exemple avec de la vaseline).

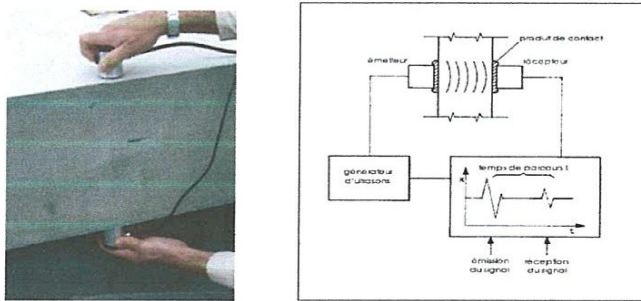


Fig 3.12: mesure en transparence

✚ Dépouillement et interprétation des résultats

➤ Calcul de la vitesse, de l'écart-type et de l'incertitude

- La vitesse est simplement calculée en utilisant la formule :

$$V=d / T$$

Avec

d : distance entre les 2 capteurs

T : temps de parcours de l'onde

- L'écart type est calculé par la formule suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Avec

n : nombre de mesures

X_i : vitesse calculée de la mesure i

x_i vitesse moyenne de l'ensemble des mesures



• **L'incertitude :**

- l'incertitude sur la mesure, comprenant les incertitudes de lecture, de l'appareil, etc....
- les incertitudes issues de l'hétérogénéité du matériau.

L'incertitude sur une mesure est calculée suivant la formule :

$$I_{NC} = T_{N,x} \times S_n$$

Avec

$$S_N = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

$T_{N,x}$: le coefficient de Student à l'indice n, correspondant à un taux de confiance de x %.

L'incertitude calculée sur une moyenne de mesures effectuées sur une zone :

$$Inc = \frac{t_{N,x}}{\sqrt{N}} \times S_N$$

Pour calculer l'incertitude sur une moyenne de mesures de vitesse du son dans une zone, on choisit généralement un taux de confiance de 95 % pour le coefficient de Student. Les valeurs de ce coefficient sont données par une table et dépendent du nombre N de mesures.

➤ **Interprétation**

Pour interpréter les résultats des tests décrits dans la partie dépouillement, il faut pouvoir prendre du recul et garder à l'esprit le but de la mission. Il faut distinguer différents niveaux d'analyses, à savoir :

- un niveau d'analyse simple qui dans le cadre d'un diagnostic complet de la structure permet de dire si la qualité du béton est homogène
- un niveau d'analyse poussé en vue d'une corrélation vitesse du son / résistance à la compression
- dans le cas d'une mission exclusive d'auscultation sonore : comparaison de la qualité du béton d'éléments verticaux dans une structure à grande échelle.

✚ **Détermination d'Homogénéité/Hétérogénéité du béton**

La qualité physique du matériau est généralement évaluée en réalisant des **mesures par transparence**.

On peut distinguer l'hétérogénéité d'ensemble et l'hétérogénéité ponctuelle.

L'**hétérogénéité d'ensemble** se traduit par une différence de caractéristiques plus ou moins importante d'un point à un autre de la structure. Les mesures permettant d'apprécier ce défaut sont les mêmes que pour l'appréciation des caractéristiques mécaniques.



L'hétérogénéité ponctuelle se traduit par des caractéristiques différentes dans l'épaisseur même de la structure à contrôler

La méthode consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton. Habituellement, lorsque de grands écarts de la vitesse de propagation de l'impulsion sont découverts sans causes apparentes dans l'ouvrage, il y a lieu de soupçonner que le béton est défectueux ou altéré.

Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité. Une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions est décrite dans le tableau suivant :

Qualité	Vitesse de propagation des impulsions
Excellente	> 4000 m/s
Bonne	3500 m/s à 4000 m/s
Douteuse	3000 m/s à 3500 m/s
Mauvaise	< 3000 m/s

Concernant l'incertitude, si les conditions de mesures sont très bonnes (bon état de surface, pas de bruit environnant), l'incertitude varie généralement de 50 à 100 m/s, mais dans de mauvaises conditions, elle est supérieure à 300 m/s.

Lors d'une analyse rapide, si les vitesses mesurées sur les divers éléments et les écarts types sont du même ordre de grandeur on peut estimer que la qualité du béton peut être comparable pour ces éléments.

Si un élément a une vitesse moyenne faible et un écart-type élevé ; cela signifie qu'il est en mauvais état, probablement fissuré, ou bien ayant eu une mise en œuvre médiocre.

b) Mesure en semi-transparence (méthode semi-directe)

Cette méthode consiste à placer l'émetteur sur une face et le récepteur sur une face perpendiculaire. Il est utilisé lorsque toute la structure n'est pas accessible.

Cette méthode ne fait pas l'objet d'une fiche spécifique puisque seule la position de l'émetteur diffère.

Elle est plutôt destinée à ausculter un volume de béton qu'un état de surface (recherche de défauts interne qui s'apparente à la topographie sonique). Elle peut être utilisée en complément d'information de la méthode en transparence.

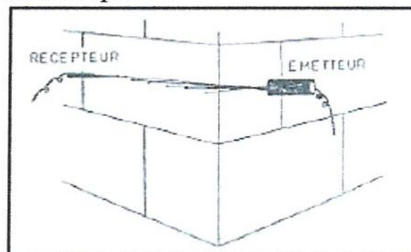


Fig 3.13 : mesure en semi-transparence



c) La mesure en surface (méthode indirecte)

La plupart du temps, la géométrie de l'ouvrage se prête mal à des mesures par transparence, soit que la face opposée est inaccessible, soit que la distance émetteur-captur est très difficilement mesurable (difficulté de positionnement des deux palpeurs sur les deux faces opposées).

Des ondes ultrasonores de surface (dans la bande de fréquence 60 kHz – 180 kHz) sont alors utilisées pour caractériser les premiers centimètres du béton. Cela en fait un outil idéal pour l'étude des bétons d'enrobage.

A ces fréquences, la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que la dimension des granulats; le caractère fortement hétérogène du béton perturbe la propagation des ondes qui sont alors en régime de diffusion multiple. Les signaux peuvent être scindés en une partie cohérente

(qui résiste au calcul des moyennes) et une partie non cohérente correspondant à la diffusion multiple de l'onde incidente sur une configuration donnée de granulats rencontrés. Il est donc nécessaire de mesurer plusieurs réalisations indépendantes du désordre afin d'évaluer le champ cohérent, qui décrit les propriétés d'un milieu homogène effectif. On extrait des mesures les courbes de dispersion en vitesse de phase et d'atténuation pour les ondes de Rayleigh cohérentes. Ces courbes mettent en évidence un gradient de propriétés du béton étudié avec la profondeur.

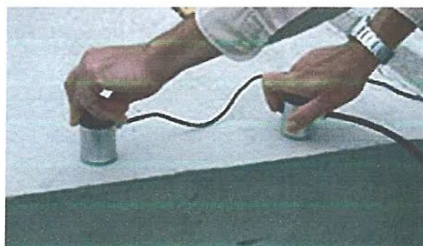


Fig 3.14. mesure en surface

✚ Evaluation de l'épaisseur d'une bicouche

Une bicouche est la superposition de 2 couches d'un matériau de qualité différente.

Pour qu'une bicouche puisse être détecté et que sa profondeur soit déterminée, il est impératif que :

- la couche supérieure soit de qualité moindre
- L'épaisseur totale maximale de béton investigué est de 6-8 cm

On pourra ainsi déterminer l'épaisseur de la couche de béton altéré en surface. Cette altération pouvant notamment être due au gel du béton, à son altération par un incendie.

➤ Principe

Cette méthode consiste à faire des mesures ponctuelles à partir d'une seule face accessible sur laquelle sont positionnées l'émetteur et le récepteur. L'émetteur est fixe et le récepteur se déplace sur une ligne par rapport à l'émetteur pour la prise de mesures.

Afin que les mesures soient répétitives, représentatives et correctes un certains nombre de précautions doivent être prises.



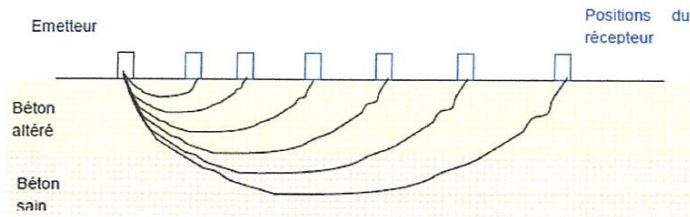


Fig 3.15 : principe de détermination de l'épaisseur d'un bicouche

➤ **Dépouillement et interprétation**

Il faut porter les différentes valeurs relevées dans un repère orthogonal ayant le temps en abscisse, exprimé en microsecondes et la distance en ordonnée exprimée en centimètres.

Graphiquement on peut ainsi déterminer la distance à laquelle a lieu le point de rupture de la pente.

On effectue 2 régressions linéaires, la première pour toutes les mesures réalisées entre l'émetteur et la distance d0, et la seconde pour toutes les mesures réalisées entre la distance d0 et la mesure la plus éloignée. On obtiendra ainsi les équations des 2 droites représentant les domaines de propagation du son dans le béton altéré, puis dans le béton sain.

Pour les 2 domaines on calcule la vitesse de propagation du son.

On peut calculer l'épaisseur de la couche de béton altérée par la formule :

$$e = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

d : la distance du point de rupture de la pente

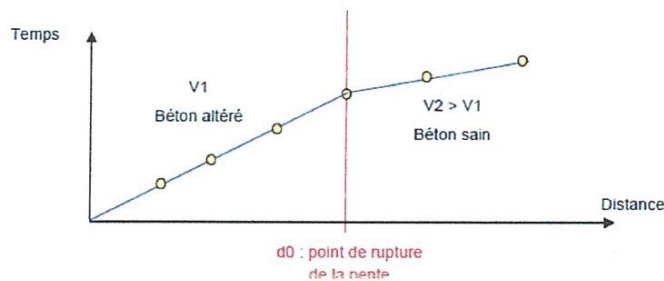


Fig 3.16 :Exemple de Dépouillement d'une mesure en surface

Caractérisation des fissures

La fissuration est un problème majeur au regard de l'intégrité des ouvrages en béton du génie civil. En effet, ces derniers tiennent principalement leurs propriétés mécaniques des armatures d'acier qu'ils contiennent. Généralement c'est ceux sont les fissures dans le béton d'enrobage qui sont mises en évidence, la première nappe de ferrailage ne se situe qu'à quelques centimètres de la surface, protégée par le béton d'enrobage. Le rôle de ce dernier est principalement d'assurer la protection des aciers contre les agents agressifs présents naturellement dans l'environnement d'un ouvrage.



Une mauvaise étanchéité de ce béton entraîne une corrosion des armatures, engendrant une dégradation de la structure. Il est donc particulièrement important de pouvoir caractériser l'état du béton, afin de prévenir au plus tôt tout endommagement de la structure.

✚ Détermination de l'épaisseur de fissures

L'évaluation de la profondeur de fissures est souvent appliquée aux dalles, ou dallages afin de déterminer :

- si la fissuration est homogène sur l'ensemble de l'élément
- si la fissure est traversant ou non (risques d'infiltration d'eau et d'humidité à l'intérieur d'un bâtiment par exemple).
- afin de mieux définir les réparations à effectuer. En fonction des profondeurs, le type et le coût des réparations peut varier de manière importante.

La morphologie d'une macro-fissure typique dans le béton peut être décrite en deux parties. La première, pour laquelle les deux lèvres ne sont pas en contact, est ouverte en surface. La seconde, pour laquelle les deux lèvres de la fissure sont partiellement ou totalement en contact, est considérée comme fermée.

Des méthodes standard, comme la vitesse de propagation des ondes à des fréquences allant de 10 à 100 kHz ne sont pas en mesure de fournir des informations concernant la présence de défauts locaux de l'ordre du centimètre.

Dans le but d'augmenter la résolution de l'inspection, l'emploi d'ondes ultrasonores de plus hautes fréquences est nécessaire. Cependant, lorsque les longueurs d'ondes sont de l'ordre de la dimension des granulats, les signaux observés sont très fortement influencés par le phénomène de diffusion multiple. Dans le béton, qui contient une grande quantité de diffuseurs, de composition, taille et forme différentes, l'énergie ultrasonore se trouve dispersée dans le temps et dans l'espace.

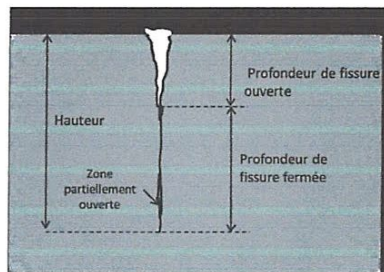


Fig 3.17 :Description de la morphologie d'une fissure dans le béton

➤ **Principe**

Le principe général de mesure consiste à générer et recevoir des ondes aux N distances à l'aide d'une paire de transducteurs identiques, déplacés manuellement le long du profil de mesure.

L'onde générée par l'émetteur est reçue aux distances $R1, R2...RN$ espacées uniformément de Δx . Afin de limiter le nombre des récepteurs nécessaires, un seul récepteur est déplacé et les enregistrements sont effectués dans chaque point de mesure.

➤ **Dépouillement et interprétation**



On étudie tout d'abord la régression correspondant au béton intact en éliminant les points correspondant à la fissure et ensuite l'écart Δt qui permet d'estimer la profondeur selon la relation :

$$h = V \times \Delta t$$

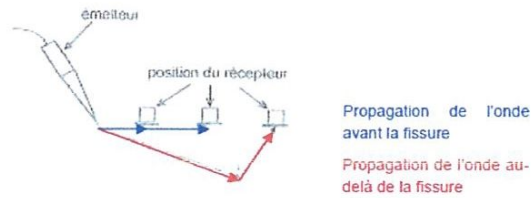


Fig 3.18a : Principe de détermination de l'épaisseur de fissure

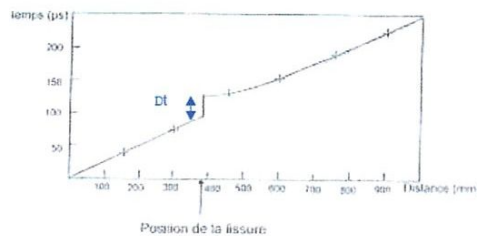


Fig 3.18b : Exemple de Dépouillement d'une mesure de l'épaisseur de fissure

Une telle procédure, bien adaptée aux conditions de laboratoire, n'est pas appropriée aux mesures in situ. Ses défauts majeurs sont le temps de mesure extrêmement long, les erreurs en positionnement des capteurs et la non répétitivité du couplage des récepteurs. Afin de résoudre ces problèmes, un appareil automatique a été conçu. Il constitue un support mobile pour les transducteurs qui se déplacent automatiquement. Le déplacement des capteurs et l'enregistrement des données sont contrôlés par l'ordinateur.

Grâce à cette approche, au regard de l'approche traditionnelle :

- le temps de mesure a été raccourci au moins dix fois,
- l'application des capteurs sans contact a résolu le problème du couplage,
- l'utilisation du système automatisé a assuré une précision suffisante de positionnement du capteur et, en même temps un nombre de points de réception N suffisamment grand, permettant de réaliser une moyenne fiable.



Fig 3.19: détermination de fissures par système automatisé

➤ Limites de la méthode

Il ne s'agit pas d'une mesure à l'aide d'une jauge de profondeur ; on extrapole avec une certaine erreur la profondeur de la fissure à partir du temps de propagation du son dans le matériau. Une fissure n'est jamais rectiligne mais irrégulière, c'est pourquoi cette méthode



nous permet uniquement d'obtenir une **estimation** de la profondeur de la fissure (à 1-2 cm près)

- On est toujours limité dans la profondeur d'évaluation d'environ 8 cm pour les mesures en surfaces.

- Si la fissure est colmatée avec de la calcite par exemple, on ne peut pas déterminer la profondeur de la fissure. Le matériau de colmatage dans la fissure véhicule l'onde ultrasonique, qui n'est plus obligée de « contourner » la fissure.

✚ Mesure de l'endommagement

La méthode ultrasonique est basée sur le fait que plus le milieu de propagation est microfissuré, plus la propagation des ondes est perturbée et leur vitesse diminue. Cette méthode permet de caractériser le niveau d'endommagement selon la formule suivante :

$$D_{app} = 1 - \frac{E}{E_0} = 1 - \left(\frac{V}{V_0} \right)^2$$

Avec D_{app} l'endommagement apparent, E_0 et V_0 sont le module d'élasticité et la vitesse d'ultrason initiaux. E et V sont le module d'élasticité et la vitesse d'ultrason fonction de l'état d'endommagement du matériau.

d) Ondes rétrodiffusées

Lorsque le béton d'un ouvrage se présente sous la forme d'une structure dont l'épaisseur est inconnue, mal connue, ou trop grande, aucune mesure de célérité ultrasonore (= distance / temps) ne peut être réalisée, on utilise les ondes rétrodiffusées.

Le béton étant particulièrement hétérogène une partie importante de l'énergie est diffusée dans l'espace. Cette partie de l'onde interagit d'une manière successive sur l'ensemble des diffuseurs situés sur son parcours. Les signaux rétrodiffusés correspondent à la somme des composantes qui retournent vers le traducteur. Ces signaux, composés de « bruit de structure » souvent éliminé en contrôle non destructif, deviennent dans notre cas porteur d'informations représentatives du matériau et de son état. L'atténuation de ces ondes rétrodiffusées est liée à la taille, densité et nature des diffuseurs ainsi que des caractéristiques de la matrice.

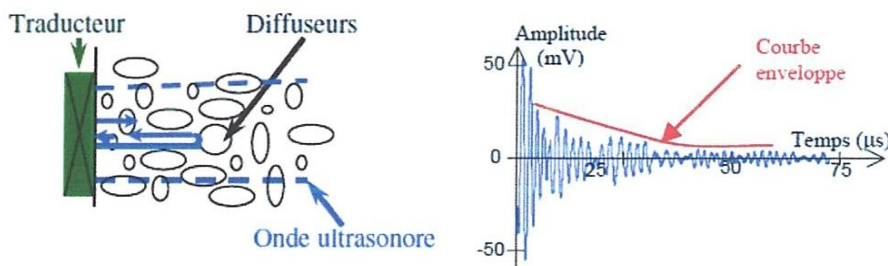


Fig 3.20a : Ondes rétrodiffusées dans le béton fig 3.20b : Signal rétrodiffusé simulé et enveloppe

L'amplitude des contributions est décroissante dans le temps et Sanie propose un modèle pour extraire l'atténuation du signal reçu par le traducteur $r(t)$ sur la base de l'équation suivante.



$$r(t) = u_0 \cdot e^{-\alpha \cdot C \cdot t} \cdot \sum_{k=1}^M \sigma_k \cdot e^{i \cdot \phi_k}$$

où u_0 est l'amplitude initiale de l'onde, α est l'atténuation des ondes rétrodiffusées, C la vitesse des ondes dans le matériau et t le temps.

M définit le nombre de diffuseur et $s k$ correspond à la section de diffusion liée aux caractéristiques des diffuseurs. La position temporelle $k t$ des diffuseurs est définie par

$$\phi_k = \omega \cdot (t - \tau_k)$$

Dans l'hypothèse d'un signal en champ lointain et de diffuseurs distribués aléatoirement en terme de dimension et de position, nous pouvons approximer la décroissance du signal par son enveloppe. La connaissance de la vitesse conduit alors à l'extraction de l'observable α .

Dans le cas de plusieurs diffuseurs il est possible d'introduire des fonctions de diffusion qui caractérisent chacun d'eux.

Par exemple dans la formule suivante qui caractérise l'endommagement par fissuration la première somme est représentative de la diffusion liée à la composition du béton et la seconde représente la diffusion liée à l'endommagement.

$$r(t) = u_0 \cdot e^{-\alpha \cdot C \cdot t} \cdot \left(\sum_{k=1}^M \sigma_{sk} \cdot e^{i \cdot \phi_k} \sum_{j=1}^{M'} \sigma_{sj} \cdot e^{i \cdot \phi_j} \right)$$

Avec σ_{sk} de section de diffusion de granulats σ_{sj} section de diffusion de fissures

Principe Génération – réception de l'onde

Le principe de génération est réalisé par un traducteur unique ou par un traducteur à deux pastilles émettrice et réceptrice séparées annulaires. L'information est intrinsèque au signal et se suffit à elle-même.

Pour le traducteur à une seule pastille, les vibrations de la cellule piézoélectrique lors de l'émission perturbent les ondes rétrodiffusées enregistrées sur une durée du signal. Il faut éliminer cette zone morte lors du traitement ultérieur de la partie décroissante du signal.

Le traducteur émetteur-récepteur séparés permet de n'enregistrer que les informations issues de la rétrodiffusion. La pastille extérieure en forme de disque est l'émetteur et la pastille intérieure est le récepteur. Les deux pastilles phonétiquement isolées n'interfèrent pas et seules les ondes diffusées par les granulats ou fissures sont réceptionnées par le récepteur. Il est alors plus facile et plus adéquat de travailler avec sur un signal issue du système émetteur-récepteur

La difficulté est que le faisceau émis est biconique et le temps d'arriver sur la pastille réceptrice dépend de profondeur de l'interaction faisceau-diffuseur. L'exploitation du signal



nécessité d'éliminer un temps suffisant pour que le signal rétrodiffusé soit issu d'un volume diffusant représentatif du matériau et toujours équivalent. Cette zone morte éliminée autorise de travailler alors sur la partie décroissante du signal.

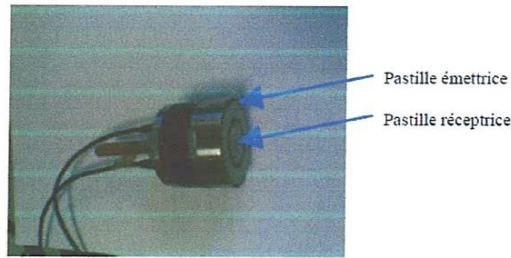


Fig 3.21: transducteur émetteur-recepteur

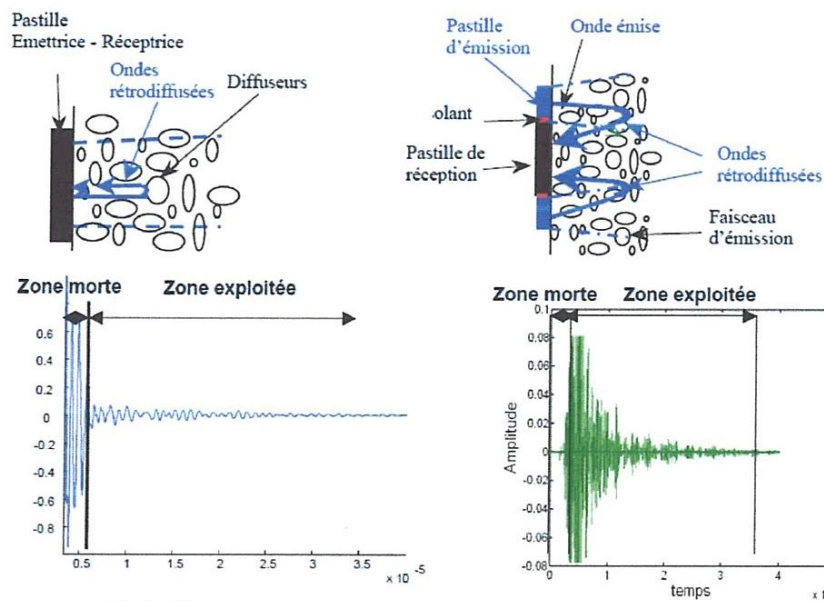


Fig3.22a :Faisceau rétrodiffusé :à pastille

Fig3.22b : Faisceau rétrodiffusé : à émetteur récepteur séparés

Partie 4 :

CORRELATION PROPRIETES

ULTRASONS/PROPRIETES DU BETON

Introduction

Le diagnostic des ouvrages repose souvent sur la détection de zones d'altération, c'est-à-dire de zones dans lesquelles les propriétés (porosité, teneur en eau, fissuration...) se distinguent significativement des valeurs représentatives des zones saines. La difficulté consiste donc, pour le paramètre recherché (qui n'est en général estimé qu'indirectement), à identifier dans quelle mesure les différences relevées entre la zone « saine » et la zone « altérée » traduisent des propriétés effectivement différentes ou, au contraire, peuvent soit relever de la variabilité naturelle du matériau, soit s'expliquer par un manque de précision de la mesure.

Fournir aux experts en diagnostic des outils plus fiables passe donc par l'identification des niveaux d'incertitude qui peuvent être attachés aux différentes mesures, par l'établissement des corrélations entre mesure et propriété recherchée, et par l'analyse du degré de signification de ces corrélations. On pourra alors attacher à chaque estimation une certaine qualité et disposer d'un diagnostic de qualité.

La mesure de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le béton nous donne donc des indications sur l'homogénéité du béton, l'estimation du module d'élasticité, la profondeur de fissures ainsi que sur la résistance à la compression du béton en effectuant des corrélations entre ces paramètres et la vitesse de diffusion des impulsions.

4.1 Corrélation : résistance à la compression / vitesse du son

Il s'agit essentiellement d'apprécier la résistance à la compression du béton par des mesures faites en transparence grâce à l'étalonnage résistance à la compression/vitesse de propagation du son préalablement réalisé. Ces relations permettent d'évaluer la résistance du béton d'un ouvrage avec une marge d'erreur de $\pm 20\%$ pourvu que la composition du béton et les types de granulats ne varient pas. Ce type de corrélation peut être effectué afin de déterminer la résistance à la compression du béton d'un grand nombre d'éléments sans effectuer de trop nombreux carottages en vue de calculer la capacité portante de ces éléments.

Cependant il est important de préciser qu'il n'existe pas de relation physique entre la résistance de compression du béton et la vitesse de propagation des ondes ; les essais permettent d'établir des corrélations empiriques. Donc il faut définir une corrélation particulière entre ces deux grandeurs pour chaque cas précis.

4.1.1 Mode opératoire

La méthode consiste à effectuer des essais d'écrasement sur différentes éprouvettes (prélevées in situ ou confectionnées au laboratoire) et à faire des mesures de vitesse d'ultrasons par méthode directe. Cependant pour obtenir des résultats satisfaisants des mesures doivent être prises :

- parmi une population, il faut au moins **neuf couples** de résultats d'essai (R_c / V_s), soit 3 prélèvements par gamme de vitesse (faible, moyenne et élevée)
- l'interprétation n'est valable que pour une étendue de vitesse ayant permis d'établir la corrélation : c'est-à-dire l'étendue de vitesse sur laquelle toutes les R_c ont été réalisées. Ainsi il faut essayer de positionner un carottage sur l'élément ayant la vitesse moyenne la plus forte et un carottage sur l'élément ayant la vitesse la plus faible (hors valeurs aberrantes).
- Pour des résultats significatifs l'étendue des mesures de vitesse doit être supérieure à **500 m/s**.
- il faut réaliser les carottages au droit des mesures de vitesse du son.





Fig 4.1a : Mesure en transparence



fig 4.1b: l'essai d'écrasement à la presse

4.1.2 Influence de la composition du béton

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

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

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

Un autre constat, qui est lié aux constatations précédentes, est qu'à un niveau de résistance donné la vitesse des ultrasons dans le béton augmente avec le rapport S/S+G. La variation de la vitesse diminue quand la résistance à la compression augmente par les effets de l'âge ou de la diminution du rapport E/C. (BENOUIS et al, 2008)

4.2 Corrélation : Vitesse ultrasonore/constantes élastiques

Comme la vitesse du son dans les milieux solides ne dépend pratiquement pas de la fréquence en dessous de quelques MHz, il est possible de déterminer les constantes élastiques par l'intermédiaire du temps de transmission d'une impulsion.

Le module d'Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement de 100% de la longueur initiale d'un matériau, si on pouvait l'appliquer réellement.

Pour le mesurer, un signal électrique est transformé en onde de déformation par un transducteur piézoélectrique. Cette onde se propage dans l'échantillon, on mesure le temps τ et on en déduit la vitesse des ondes ultrasonores :

$$V = L/\tau$$

L'utilisation de transducteurs qui génèrent des ondes longitudinales ou transversales permet de remonter aux caractéristiques d'un matériau élastique linéaire et isotrope par les deux vitesses associées V_L et V_T ; néanmoins, très important de bien vérifier que les dimensions latérales de l'échantillon sont soit beaucoup plus grandes ou soit beaucoup plus petites que la longueur d'onde moyenne de l'impulsion.

Selon le type d'onde les relations suivantes sont valables.

Mesure des vitesses longitudinales

$$V_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Mesure des vitesses transverses

$$V_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \times \sqrt{\frac{1}{2(1+\nu)}}$$

Avec E le module de Young, ν le coefficient de Poisson, ρ la masse volumique.

Mesures et calculs

Pour calculer le temps de transit, on va tracer la courbe du temps de mesure en fonction de l'épaisseur du matériau.

D'après l'équation de VT, on peut retrouver les expressions de E et ν .

$$\nu = \frac{V_L^2 - 2V_T^2}{2V_L^2 - 2V_T^2}$$

$$E = 2\rho V_T^2(1+\nu)$$

4.3 Corrélation : vitesse ultrasonore/porosité.

La durabilité des bétons dépend beaucoup de la porosité, cette dernière conditionne l'intensité des interactions du béton avec les agents agressifs. Les pores à l'intérieur de l'ouvrage facilitent le processus d'endommagement, lequel s'initie généralement en surface. La mesure de caractérisation la plus utilisée est sans doute la mesure de la porosité accessible à l'eau. Ces essais sont de nature « destructive » et nécessitent le prélèvement de carottes dans les ouvrages à qualifier. Il est établi que la densité ainsi que les modules d'élasticité sont reliés aux vitesses des ultrasons et comme ces derniers dépendent de la porosité, il est possible qu'il y ait corrélation entre la porosité et les paramètres ultrasoniques. Il est indiqué que la vitesse des ultrasons diminue et leur atténuation augmente à mesure que la porosité augmente. Cependant, ces tendances peuvent différer pour les matériaux saturés. Hernandez et al. ont obtenu des évaluations de la porosité par essais non destructifs. Leur évaluation est basée sur le modèle micromécanique établi par Jeong et Hsu. Un tel modèle nécessite beaucoup de paramètres, qui peuvent être inconnues et la précision exigerait la connaissance au préalable de la granulométrie. Marc Goueygou a aussi essayé de relier les propriétés ultrasoniques à la porosité et à la perméabilité des mortiers sains et endommagés. Cette étude a montré la difficulté d'obtenir des évaluations précises des paramètres ultrasoniques, en raison de l'importance de la variabilité des matériaux étudiés.



L'utilisation de la technique des ultrasons pour l'estimation de la porosité peut s'avérer adéquate aussi bien en terme de temps d'intervention que d'économie des essais. Cette étude consiste à faire le rapport entre les valeurs de la porosité (à l'eau ou à l'air) déterminées par mesure classique et les valeurs des vitesses mesurées par ultrasons.

Certains paramètres peuvent influencer sur les valeurs trouvées.

- La composition du béton : pour déterminer cette influence, il convient d'effectuer des mesures sur des bétons de rapport Eau/Ciment et S/S+G différents.
- L'influence du diamètre des transducteurs : La mesure par ultrasons se fait par des transducteurs, qui peuvent être de même type mais de diamètres différents. Cette expérience permet de déterminer comment ce diamètre influence sur les valeurs trouvées. Ce sera également l'occasion d'affirmer ou d'infirmer la théorie énoncée au chapitre précédent.

4.3.1 Mesure de la porosité

La méthode de caractérisation la plus utilisée est sans doute la mesure de la porosité accessible à l'eau et de la masse volumique apparente par pesée hydrostatique.

Cette mesure simple, praticable sur une large variété de pâtes de ciment, mortiers ou bétons est considérée comme la base de toute caractérisation microstructurale ou d'évaluation des propriétés de durabilité d'un matériau. Elle fournit un résultat global (porosité "totale"), indicateur de la qualité du matériau

Pour la mesure de la porosité accessible à l'eau, la méthode consiste à saturer en eau et sous vide un échantillon. Une fois que tous les pores interconnectés sont remplis d'eau, l'échantillon est pesé au centième de gramme et son volume est déterminé par pesée hydrostatique. Ensuite, l'échantillon est placé dans une étuve à une température de $60 \pm 2^\circ \text{C}$ puis de 105°C .

Le séchage est arrêté à la stabilisation de la masse, ceci est obtenu lorsque la variation entre deux pesées successives ne dépasse pas 0.05%.

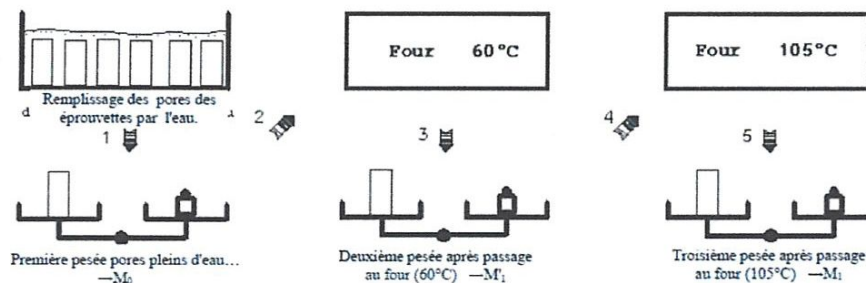


Fig 4.2 : détermination de la porosité

La porosité P est déterminée en utilisant la formule suivante :

$$P = \frac{M_{sat} - M_{sec}}{\rho_{sat} \cdot V}$$

Avec M_{sat} est la masse saturée, M_{sec} est la masse sèche, V est le volume de l'échantillon et ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau.



Influence de la composition du béton sur la porosité

Pour mettre en évidence l'effet de la composition du béton sur la porosité des mesures de porosité sont effectuées sur différents échantillons avec des rapports E/C et S/S+G différents. Ensuite les résultats sont reportés sur un repère avec les valeurs de porosité trouvées et de rapport E/C ou S/S+G. Les résultats montrent une variation quasiment linéaire entre la porosité et les rapports E/C et S/S+G jusqu'à un certain seuil. La porosité croît avec l'augmentation des rapports (S/S+G) et E/C. De plus la nature du gravier influe peu sur la porosité. (BENOUIS *et al* 2008)

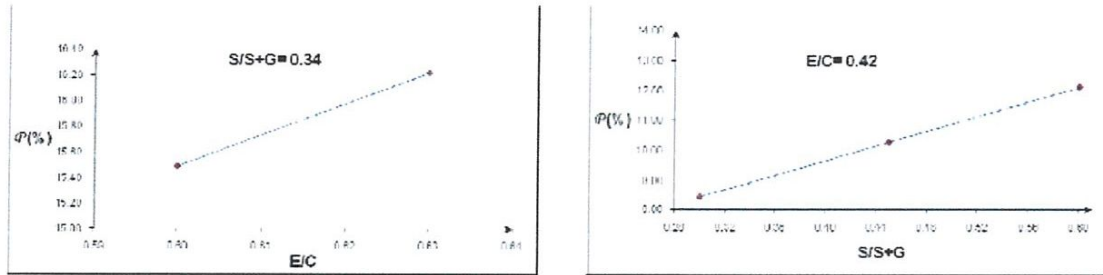


Fig 4.3 : Evolution de la porosité des bétons en fonction des rapports S/S+G et E/C (BENOUIS *et al* 2008)

4.3.2 Relations entre la vitesse des ultrasons et la porosité

L'expérience consiste à estimer la porosité accessible à l'eau par les mesures des vitesses des ultrasons.

Bien que cette corrélation soit réduite par l'influence de plusieurs facteurs extérieurs, les résultats mettent en évidence la sensibilité de l'onde de surface à la variation de la porosité sous un certain seuil. Cette sensibilité laisse envisager la possibilité de quantifier les propriétés du transfert dans les matériaux à matrice cimentaire, notamment la porosité, à partir d'une mesure non destructive.

Le béton 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 peut être approchée par la forme linéaire suivante :

$$V_T \approx (1 - bP) V_{T0}$$

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

Selon Shoklnik, ce paramètre empirique ' b ' est constant et dépend du coefficient de Poisson du matériau à porosité nulle (ν_0)

$$b_{shko} = 15 \frac{1 - \nu_0}{7 - 5 \nu_0}$$

Si on suppose que le coefficient de Poisson varie en fonction de la porosité, l'équation précédente devient sous la forme suivante :



$$V_T \approx (1 - b_T P) V_{T0}$$

Avec b_T est un paramètre empirique.

En ce qui concerne les ondes de Rayleigh, la vitesse V_R est donnée en fonction de V_L par la relation implicite suivante :

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

Bergman propose une solution approchée de l'équation précédente. Cette approche définit une approximation de la vitesse de propagation de l'onde du Rayleigh en fonction de la vitesse transversale et du coefficient de Poisson du matériau.

$$V_R \approx f(\nu) V_T$$

$$f(\nu) = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu}$$

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

$$V_R \approx (1 - bP) V_{R0}$$

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

$$b = 15 \frac{1 - \nu_0}{7 - 5 \nu_0} \approx 2$$

V_{R0} modèle prévoit donc une variation linéaire de la vitesse de l'onde de Rayleigh en fonction de la porosité, avec une pente b voisine de 2,

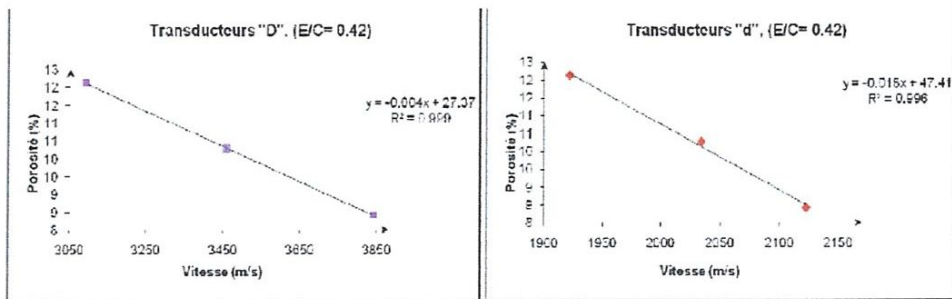


Fig 4.4 : Relation entre la porosité accessible à l'eau et vitesses ultrasonores (BENOUIS et al 2008)



REMARQUE :

On peut estimer de manière acceptable la porosité à partir des vitesses des ultrasons pour des bétons ordinaires ou fluides ($E/C \geq 0.5$). (BENOUIS *et al* 2008)

4.4 Corrélation perméabilité/ vitesse du son

La perméabilité est une propriété d'un milieu poreux solide de présenter une capacité d'écoulement d'un fluide sous un certain gradient de potentiel. Les propriétés physiques du béton, dont sa perméabilité, influencent la durée de la période d'amorçage des pathologies. C'est surtout la perméabilité de la peau du béton qui est la plus étroitement liée à la durabilité. En effet, c'est véritablement cette peau qui bloque ou ralentit le passage des agents agressifs (liquides, gaz, ions) qui peuvent corroder la masse du béton ou les aciers d'armature.

Les caractéristiques (et le degré de protection) de la peau du béton sont fonction de très nombreux paramètres.

- Paramètres de composition du béton (E/C, ajouts minéraux, ...)
- Techniques de séchage et de mise en place
- Fissuration due au retrait
- Fissuration due aux charges de service.

Toutefois ce type de mesure in situ est influencé par la teneur en eau du béton, qui limite son application.

D'après des études effectuées, Il existe un lien entre la perméabilité et la résistance à la compression du béton. La perméabilité diminue rapidement avec l'augmentation de la résistance. Cependant, pour des résistances supérieures à 55 MPa , la perméabilité évolue très peu et atteint un niveau très faible. (Université de Sherbrooke). Il est donc possibles d'effectuer une corrélation entre la perméabilité et les vitesses ultrasonore.

4.4.1 Mesures de perméabilité

En laboratoire, il est relativement facile de déterminer quelle est l'influence des paramètres de composition du béton sur la perméabilité du béton. Cependant, il est assez difficile d'évaluer précisément quels sont les effets des techniques de séchage et de mise en place utilisées en chantier et comment la fissuration peut influencer la perméabilité du béton de peau (mesures in situ).

Deux types de perméabilités peuvent être mesurer:

Perméabilité à l'air : sa détermination consiste en la mise en pression d'une enceinte, et la mesure de la décroissance de la pression.



Perméabilité à l'eau : dans ce cas, l'essai consiste en la mise en pression d'eau d'une enceinte, et la mesure du débit d'eau sous pression. C'est le type de mesure le plus souvent utilisée. Cependant il n'existe pas procédure standard pour mesurer la perméabilité à l'eau, mais dans la plus part des cas les procédures sont basées sur le même principe qui consiste à appliquer une pression hydraulique à une extrémité d'un échantillon cylindrique et à mesurer le débit de percolation en régime permanent.

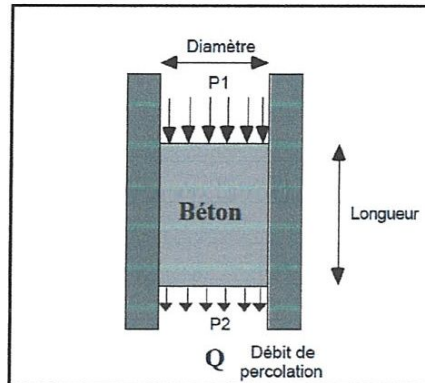


Fig 4.5 : Principe de fonctionnement d'un appareil de mesure de la perméabilité à l'eau.

À partir du débit de percolation et des dimensions de l'échantillon, on peut déterminer la perméabilité (K) selon la loi de DARCY et finalement en tirer le coefficient de perméabilité (Kw).

$$Q = -K \cdot \frac{A}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \cdot \frac{(P_2 + P_1)}{2P_1}$$

Q = débit volumique du gaz de viscosité μ A = aire de la section d'écoulement

K = Perméabilité du milieu (s'exprime en m²) DP = gradient de pression

L = longueur d'écoulement

P1 = pression à l'entrée

P2 = pression à la sortie

Ensuite on détermine le coefficient Kw par :

$$Kw = K \cdot \frac{w_e}{\mu_e}$$

Avec w_e = poids volumique de l'eau (à 20 °C = 104 N/m³)

μ_e = viscosité de l'eau (à 20 °C = 10⁻³ N.s/m²)



K = Perméabilité du matériau (équation de DARCY)

K_w = Coefficient de perméabilité à l'eau (m/s)

a) Facteurs d'influence

🚧 Le rapport E/C.

Pour les rapports E/C les plus faibles (<0,30), la perméabilité atteint des valeurs très faibles

(< 5×10^{-14} m/s). En pratique, on peut considérer que ces bétons sont imperméables à l'eau.

(Université de Sherbrooke)

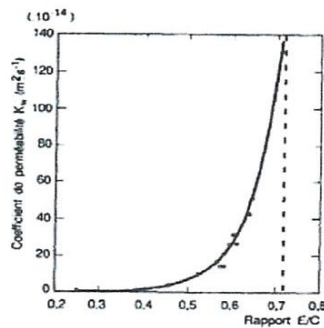


Fig 4.6 : Coefficient en fonction du rapport E/C

🚧 La zone d'interface pâte-granulat

Pour un même rapport E/C, la perméabilité à l'eau du mortier ou du béton est généralement supérieure à celle de la pâte en raison de la zone d'interface pâte-granulat. Poreuse que le reste de la matrice formée par la pâte de ciment hydraté. Elle présente souvent une plus grande densité de microfissures. Cette zone offre donc un chemin préférentiel pour le passage de l'eau, des gaz ou des ions. (Université de Sherbrooke).

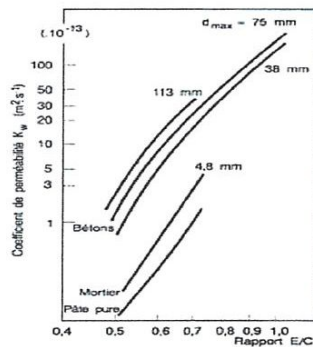


Fig 4.7: Coefficient en fonction du rapport E/C pour le béton, mortier et de pates de ciment



✚ La durée du mûrissement

Une période de cure humide plus longue réduit significativement la perméabilité à l'eau du béton. L'influence de la durée du mûrissement devient de moins en moins importante à mesure que le rapport E/C diminue.

4.4.2 Mesure de la vitesse ultrasonore

La méthode de mesure de la vitesse des ultrasons dépend de caractéristiques recherchées et de l'accessibilité de la zone à ausculter. Il peut s'agir d'ausculter la peau d'un béton dans ce cas la méthode à utiliser sera la mesure en surface (ondes de Rayleigh) qui ausculte les premiers centimètres du béton ou d'une mesure en transparence (souvent au laboratoire) sur des éprouvettes prélevées sur ouvrages ou confectionnées.

La principale raison pour utiliser des fréquences ultrasonores élevées dans le cas de la transmission indirecte, est d'accroître la sensibilité des paramètres acoustiques aux inclusions (grains du sable, vides) du milieu de propagation.

Il faut porter les différentes valeurs relevées dans un repère orthogonal ayant le temps en abscisse, exprimé en microsecondes et la distance en ordonnée exprimée en centimètres.

La vitesse des ondes est estimée à partir de la pente de la courbe linéaire qui donne la variation du temps (acquisition du signal) en fonction de la distance (entre l'émetteur et le récepteur) :

$$VR = \frac{1}{d}$$

Où d est la pente de la droite qui donne la variation du temps (acquisition du signal) en fonction de la distance (entre l'émetteur et la récepteur).

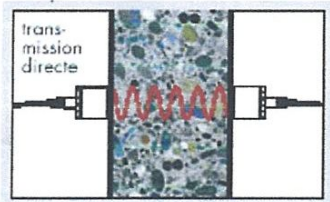


Fig 4.8a : Mesure en transmission direct



Fig 4.8a : Mesure en transmission indirect

Conclusion sur auscultation ultrasonore

Le contrôle et l'évaluation non destructifs de structures en béton par analyse d'ondes ultrasonores sont utilisés depuis longtemps, mais seules des démarches empiriques robustes avaient permis de répondre partiellement aux questions posées. Aujourd'hui, les travaux de développement et de recherche réalisés permettent de prendre en compte la majeure partie des paramètres influents et d'améliorer ainsi l'ensemble des aspects du contrôle.

Des progrès ont notamment été apportés dans le cadre de la compréhension des phénomènes de propagation des ondes, ainsi que dans les procédures d'évaluation et de traitement des informations recueillies. La prise en compte de la multidiffusion des ondes cohérentes doit notamment être poursuivie.

Les essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.

En résumé, les essais d'auscultation ultrasonique sont très efficaces pour contrôler la qualité du béton, et particulièrement pour évaluer l'homogénéité et détecter les fissures ou les imperfections.

En effet, l'accès souvent difficile aux structures pour effectuer des mesures constitue la première limite à l'utilisation de cette méthode non destructive. Les éléments comme revêtements ou enduits ; un habillage de briques ; le plâtre ; les faux plafonds ... empêchent d'effectuer des mesures correctes.

De plus cette technique nécessite que l'opérateur soit installé confortablement, c'est-à-dire qu'il puisse exercer une pression suffisante sur les transducteurs et de manière similaire pour toutes les mesures, afin que celles-ci ne soient pas faussées.

Le bruit, dont l'influence n'est pas encore formalisée, influence également les mesures de vitesse du son.

Enfin tous les matériaux ne peuvent pas être auscultés à l'aide de mesures de vitesses du son, à savoir :

- les bétons légers
- les bétons fibrés
- les bétons « hautes performances », où l'homogénéité n'est plus un facteur déterminant de la qualité du béton.



Conclusion Générale

Dans le cadre de PFE nous avons pu voir que les désordres qui peuvent affecter les ouvrages sont de plusieurs types .Ces derniers peuvent être dus à des agents agressifs qui proviennent de l'environnement immédiat de l'ouvrages, de réactions internes dans les matériaux qui les composent ou de sollicitations d'exploitation.

Le choix des investigations à mener dépend des conclusions suite d'une visite préliminaire suivie d'une consultation de tous les documents en relation avec l'ouvrage .Ceci permettra de faire un relevé des désordres ainsi que sur leurs origines probables. Un diagnostic plus poussé permettra ensuite d'affiner les investigations à l'aide d'appareils d'auscultation et/ou d'analyses en laboratoire.

Ces techniques d'auscultations sont choisies en fonctions du type de désordre observé sur la structure. Ces techniques peuvent être non destructives ; dans ce cas les mesures sont effectuées sans faire de dommages physiques sur l'ouvrage ; ou destructives, généralement faites pour compléter le diagnostic. Les techniques non destructives utilisent généralement des procédés électrochimiques, électromécaniques ou électromagnétiques pour caractériser les désordres

Parmi les techniques utilisées on retiendra l'auscultation ultrasonique qui fait l'objet d'une étude poussée dans le cadre de ce PFE.

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'ondes ultrasonores qui se propagent dans l'élément à contrôler .Dans le cas de cette étude il s'agissait de leur utilisation pour caractériser le béton.

En effet l'auscultation par ondes ultrasonores permet de contrôler la qualité du béton afin de détecter des zones de différentes natures, de détecter et dimensionner des défauts et d'estimer la résistance à la compression du béton. Elle peut également être utilisée pour déterminer les propriétés mécaniques du béton(modules d'élasticités ,les coefficients de poisson)

Pour cela les techniques utilisées consistent en des relations entre les vitesses des ultrasons à travers le matériau et les propriétés recherchées.

Le contrôle et l'évaluation non destructifs de structures en béton par analyse d'ondes ultrasonores sont utilisés depuis longtemps, mais seules des démarches empiriques robustes avaient permis de répondre partiellement aux questions posées. Aujourd'hui, les travaux de développement et de recherche réalisés permettent de prendre en compte la majeure partie des paramètres influents et d'améliorer ainsi l'ensemble des aspects du contrôle.

Des progrès ont notamment été apportés dans le cadre de la compréhension des phénomènes de propagation des ondes, ainsi que dans les procédures d'évaluation et de traitement des informations recueillies. La prise en compte de la multidiffusion des ondes cohérentes doit notamment être poursuivie.

L'analyse de cette technique nous a permis de mettre en évidence son efficacité à diagnostiquer plusieurs désordres pouvant affecter les ouvrages. De par sa facilité d'utilisation et son caractère non destructif, elle permet de caractériser des parties d'ouvrage souvent difficile d'accès.

Son utilisation dans de nombreux cas de diagnostic permettrait de déceler très tôt les pathologies et d'éviter ainsi des réparations coûteuses.



Conclusion Générale

Dans le cadre de ce PFE nous avons pu voir que les désordres qui peuvent affecter les ouvrages sont de plusieurs types .Ces derniers peuvent être dus à des agents agressifs qui proviennent de l'environnement immédiat de l'ouvrage, de réactions internes dans les matériaux qui les composent ou de sollicitations d'exploitation.

Le choix des investigations à mener dépend des conclusions d'une visite préliminaire suivie d'une consultation de tous les documents en relation avec l'ouvrage .Ceci permettra de faire un relevé des désordres ainsi que sur leurs origines probables. Un diagnostic plus poussé permettra ensuite d'affiner les investigations à l'aide d'appareils d'auscultation et/ou d'analyses en laboratoire.

Ces techniques d'auscultations sont choisies en fonctions du type de désordre observé sur la structure. Ils peuvent être non destructives ; dans ce cas les mesures sont effectuées sans faire de dommages physiques sur l'ouvrage ; ou destructives, généralement faites pour compléter le diagnostic. Les techniques non destructives utilisent généralement des procédés électrochimiques, électromécaniques ou électromagnétiques pour caractériser les désordres

Parmi les techniques utilisées on retiendra l'auscultation ultrasonique qui fait l'objet d'une étude poussée dans ce PFE.

Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission, la réflexion et l'absorption d'ondes ultrasonores qui se propagent dans l'élément à contrôler .Dans le cas de cette étude il s'agissait de mettre en évidence son utilisation pour caractériser le béton.

En effet l'auscultation par ondes ultrasonores permet de contrôler la qualité du béton afin de ,détecter des zones de différentes natures, et de détecter ainsi des défauts.Elle peut également être utilisée pour déterminer les propriétés mécaniques du béton (modules d'élasticités ,les coefficients de poisson).Pour cela les techniques utilisées consistent en des relations entre les vitesses des ultrasons à travers le matériau et les propriétés recherchées.

La technique est utilisée depuis longtemps, mais seules des démarches empiriques robustes avaient permis de répondre partiellement aux questions posées. Aujourd'hui, les travaux de développement et de recherche réalisés permettent de prendre en compte la majeure partie des paramètres influents et d'améliorer ainsi l'ensemble des aspects du contrôle.

Des progrès ont notamment été apportés dans le cadre de la compréhension des phénomènes de propagation des ondes, ainsi que dans les procédures d'évaluation et de traitement des informations recueillies. La prise en compte de la multidiffusion des ondes cohérentes doit notamment être poursuivie.

L'analyse de cette technique nous a permis de mettre en évidence son efficacité à diagnostiquer plusieurs désordres pouvant affecter les ouvrages. De plus de par son caractère non destructif, elle permet de caractériser des parties d'ouvrage souvent difficile d'accès.

Son utilisation dans de nombreux cas de diagnostic permettrait de détecter très tôt les pathologies et d'éviter ainsi des réparations coûteuses.



Références bibliographiques

- MAMILLAN, M. *Restauration des bâtiments en béton armé*. Techniques de l'ingénieur
- BENOUIS et al, *Détermination de la résistance des bétons par les ultrasons*. Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique - Université de Guelma
- Valentine RINCKER *Diagnostic de structures existantes* PFEINSA STRASBOURG ,2009
- Fethi SOLTANI, Zoubeir LAFHAJ, Marc GOUEYGOU. *Étude expérimentale de la propagation de l'onde de surface dans un milieu poreux sec et saturé*
- BENOUIS et al *,Estimation de la porosité des bétons par les ultrasons*
*Laboratoire de Génie Civil et d'Hydraulique – Université de Guelma*2008
- UNIVERSITE DE VALENCIENNE,*Evaluation non destructive des matériaux à l'aide des Ultrasons*. Laboratoire des Matériaux et Procédés
- Audrey QUIVIGER et al. *caractérisation ultrasonore des fissures dans le béton :*
10^{ème} congrés français d'acoustique 2010
- V. GARNIER, J. F. CHAIX, M. ROSSAT , C. PAYAN , G. CORNELOUP *,Caractérisation Non Destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores* ,LCND, Université de la Méditerranée, Aix Pce, France
- Pape Arago BODIAN, *Propagation des ultrasons en milieu hétérogène et anisotrope*
Thèse Institut National des Sciences Appliquées de Lyon,(2011)
- Mathieu CHEKROUN, *caractérisation mécanique des premières centimètres du béton avec des ondes de surface* ,Thèse Ecole centrale de Nantes (2008)
- M. EMAMI TABRIZI, M. P. LUONG, B. HALPHEN, J.C. EYTARD,*Détection de l'endommagement mécanique par ultrasons » (LMS)*, Génie civil, Ecole Polytechnique (2009)
- Hanane NECHAD, *Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante*, Thèse L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (2004)
- A. QUIVIGER et al *,Caractérisation d'une fissure devouchange dans un béton par methodes ultrasonores*, Laboratoire de Caractérisation Non Destructive, Université de la Méditerranée
- LCPC, *presentation de techniques de diagnostic de l'etat d'un béton soumis à un incendie* ,2005

Groupe de travail AFGC / CEFACOR ,Centre Français de l'Anti-Corrosion , *Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*,(2003)

Denis PARENTHOINE, *Influence des propriétés céramiques piézoélectriques sur des mesures ultrasonores non linéaires*.Thèse université François Rabelais de Tours (2008)

PING GU ,*Relevé de potentiel par demi-pile* ,Conseil national de recherches du Canada (1998)

Université de SHERBROOKE, *Durabilité et réparations du béton : les perméabilités*

R. F. FEIDMAN ,*Essais non destructifs du béton* ,Conseil national de recherches du Canada (1977)

G. Villain, X. Dérobert, O. Abraham, M. Chekroun, O. Coffec et O. Durand,*Complémentarité de techniques non destructives pour déterminer les propriétés de différents bétons hydrauliques*

