

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 Mastère

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 : BOUCENNA Ridha

**Thème : PATHOLOGIE, DIAGNOSTIC ET
REPARATION DES OUVRAGES EN BETON ARME**

Sous la direction du Dr. BENOUIS Abdelhalim

Juin 2012



DEDICACES

Je dédie ce mémoire à mes parents et surtout ma mère, pour son soutien et encouragement quotidien.

- à ma petite sœur que je lui souhaite la réussite dans ses études.

- à ma grande sœur et son mari et surtout l'adorable ange « YASMIN » (Fortonata), pour son ambiance quotidienne.

- à mes oncles, mes tantes, cousins et cousines

- tous les BOUCENNA et les SERFANI.

- aussi à tout mes amis de classe

- sans oublier mes camarades Mehdi, Rabeh et Reda, et tous ceux qui me connaissent.

REMERCIEMENTS

Dieu merci pour le pouvoir dont vous m'avez fait part ; pour terminer ce modeste travail.

Ce travail a été réalisé au sein du département de génie civil et d'hydraulique de l'université 08 mai 1945 GUELMA.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à monsieur **BENOUIS A. HALIM** pour avoir accepté d'être mon encadreur et pour l'aide considérable qu'il m'a apportée afin de réaliser ce travail.

Je remercie également les membres du jury de soutenance et aussi un grand merci à tous mes enseignants du cycle de formation Licence et Masters.

Je remercie l'ensemble de mes amis de la promotion 2011-2012 pour les moments partagés.

SOMMAIRE

DEDICACES	A
REMERCIEMENTS	B
RESUME	G
ABSTRACT	G
ملخص	H
Liste des figures :	I
Liste des tableaux :	K
Chapitre I : INTRODUCTION GENERALE	1
INTRODUCTION.	2
OBJECTIF	2
Chapitre II : PATHOLOGIE DES OUVRAGES EN BETON ET METHODOLOGIE D'UN DIAGNOSTIC	3
II-1 INTRODUCTION	4
II-2 LA FISSURATION DES OUVRAGES	4
II-2-1 FISSURATION ACCIDENTELLE	4
II-2-2 FISSURATION FONCTIONNELLE MECANIQUE	5
II-2-3 FISSURATION FONCTIONNELLE THERMIQUE	6
II-3 LA RUPTURE DES ELEMENTS EN BETON ARME	6
II-4 LES INVESTIGATIONS DANS LE BETON	6
II-4-1 PREAMBULES	6
II-4-2 EXAMEN VISUEL OU MORPHOLOGIQUE	7
II-5 MESURES IN-SITU	7
Chapitre III : TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC PAR LES ULTRASONS ET LE SCLEROMETRE	9
CARACTERISATION NON-DESTRUCTIVE DE L'ENDOMMAGEMENT	10
METHODE ULTRASONORE : (théorie des ultrasons)	10
III-1 LES ONDES	10
III-2 EMISSION ACOUSTIQUE	12
III-2-1 INTRODUCTION	12
III-2-2 PRINCIPES DE L'EMISSION ACOUSTIQUE	12
III-2-3 CAPTEURS	13
III-2-4 COUPLANTS	14
III-2-5 CARACTERISTIQUES DU SIGNAL	14
III-2-6 LOCALISATION	15
III-2-7 EFFET KAISER	16

Sommaire

III-2-8 ANALYSE STATISTIQUE MULTI-VARIABLES	17
III-3 PROPAGATION DES ONDES ULTRASONORES	18
AUTRES TECHNIQUES DE CARACTERISATION NON-DESTRUCTIVE	20
III-4 REBOUND HAMMER	20
III-5 MESURE ELECTRIQUE	21
METHODE ULTRASONORE (application des ultrasons)	24
III-6 VITESSE DE PROPAGATION DES ULTRASONS	24
III-7 APPAREILLAGE	24
III-8 DISTANCE MINIMALE DE PARCOURS	24
III-9 METHODES DE MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION DES ULTRASONS	24
III-9-1 MESURES EN TRANSPARENCE DIRECTE	24
III-9-2 MESURES EN SURFACE	25
III-9-3 MESURES EN TRANSPARENCE PAR RAYONNEMENT	25
III-10 MODE OPERATOIRE	26
III-10-1 PREPARATION DE L'ELEMENT	26
III-10-2 POINTS DE MESURES	26
III-11 INFLUENCE DES ARMATURES	27
III-11-1 FERS A BETON PLACE PERPENDICULAIREMENT A LA DIRECTION DE PROPAGATION DE L'ONDE	27
III-11-2 AXE DE L'ARMATURE PARALLELE A LA DIRECTION DE LA PROPAGATION	28
III-12 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DU BETON	29
III-13 PARAMETRES INFLUANCANTS LA VITESSE DES ULTRASONS	29
Quelques interprétations des Résultats de mesures aux ultrasons	34
III-14 PRINCIPE	35
III-15 INDICE DE REBONDISSEMENT	35
III-16 APPAREILLAGE	36
III-16-1 SCLEROMETRE	36
III-16-2 PIERRE A POLIR	38
III-16-3 BLOC D'ETALONNAGE	38

Sommaire

III-16-4 ETALONNAGE DE L'APPAREIL	38
III-16-5 MODE OPERATOIRE	40
III-16-5-1 MESURES SUR OUVRAGE	40
III-16-5-2 MESURES SUR EPROUVETTES	40
III-16-6 INCONVENIENTS DE LA METHODE SCLEROMETRIQUE	41
III-17 CONTROLE PAR LE SCLEROMETRE	42
III-17-1 METHODE DE LA COURBE UNIQUE	42
III-17-2 METHODE DE LA COURBE DE CALIBRAGE	43
III-17-3 METHODE DES COEFFICIENTS D'INFLUENCE NON CORRIGES	43
III-17-4 METHODE DES COEFFICIENTS D'INFLUENCE CORRIGES	47
Chapitre IV : TECHNIQUES DE REPARATION ET DE RENFORCEMENT	45
IV-1 INTRODUCTION	49
IV-2 CARACTERISTIQUES DES PRODUITS DE RENFORCEMENT	49
IV-3 DIFFERENTS TYPES DE REPARATION OU RENFORCEMENT	50
IV-3-1 ADJONCTION D'ARMATURES D'ACIERS	50
IV-3-1-1 INTRODUCTION	50
IV-3-1-2 MISE ENPLACE DES ARMATURES COMPLEMENTAIRES	50
IV-3-1-3 PROTECTION DES ARMATURES	51
IV-3-1-4 REFECTION DES BETONS	51
IV-3-2 PROJECTION DU BETON	52
IV-3-2-1 INTRODUCTION	52
IV-3-2-2 DESCRIPTION DES DEUX METHODES	53
IV-3-2-2-1 PROJECTION PAR VOIE SECHE	53
IV-3-2-2-2 PROJECTION PAR VOIE MOUILLEE	54
IV-3-2-3 AVANTAGES DES DEUX METHODES	54
IV-3-2-4 INCONVENIENTS DES DEUX METHODES	54
IV-3-3 CHEMISAGE DES SECTIONS DE BETON	55
IV-3-3-1 INTRODUCTION	55
IV-3-3-2 ADHERENCE ENTRE LES DEUX BETONS	56
IV-3-3-3 LES INCONVENIENTS DE CHEMISAGE	56
IV-3-4 RENFORCEMENT PAR GAINAGE METALLIQUE	56

Sommaire

IV-3-4-1 INTRODUCTION	56
IV-3-4-2 LES MATERIAUX UTILISEES	57
IV-3-4-3 LA MISE EN ŒUVRE DES PLATS COLLEES	57
IV-3-5 LE RENFORCEMENT AU MOYEN DE PROFILES METALLIQUES	59
IV-3-6 LE SCELLEMENT D'ARMATURES POUR BETON ARME	60
IV-3-7 ADJONCTION DE MATERIAUX COMPOSITES	61
IV-3-7-1 LES MATERIAUX COMPOSITES DANS LE GENIE CIVIL	61
IV-3-7-2 LES POLYMERES DANS LE GENIE CIVIL	61
IV-3-7-2-1 DEFINITIONS	61
IV-3-7-2-2 LES FIBRES DE RENFORT	62
IV-3-7-3 PROPRIETES DES RESINES EPOXYDES	63
IV-3-7-3-1 PROPRIETES MECANIQUES	63
IV-3-7-3-2 DURABILITE	64
IV-3-7-4 LES THEORIES DE L'ADHESION	65
IV-3-7-4-1 THEORIE DU MOUILLAGE	65
IV-3-7-4-2 THEORIE DE L'ANCRAGE MECANIQUE	65
IV-3-7-4-3 THEORIE DES INTERACTIONS MOLECULAIRES	66
IV-3-7-4-4 THEORIE DES LIAISONS CHIMIQUES	66
IV-3-7-4-5 THEORIE DES COUCHES INTERFACIALES DE FAIBLE COHESION	66
IV-3-7-4-6 LE COLLAGE EN MILIEU POREUX	67
Chapitre V : DIAGNOSTIC DES REPARATIONS ET RENFORCEMENTS	71
V- CARACTERISATION DE L'ADHERENCE	72
V-1 MODES DE RUPTURE	72
V-2 MODES DE SOLLICITATION	72
V-3 DYNAMOMETRE DE TRACTION	75
V-4 ESSAI DE COMPRESSION	76
CONCLUSION :	78
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	79

RESUME

Malgré que certains ouvrages en béton armé demeurent en bon état sous des conditions climatiques rigoureuses et sévères, les désordres survenus au niveau des structures sont souvent dus aux dégradations des matériaux employés, ou au changement de fonctionnalité du bâti (l'accroissement de surcharges d'exploitation).

Après diagnostic et investigations diverses, et afin d'y remédier à cette problématique il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes soient de réparation soient de renforcement. Les techniques de renforcement des structures en béton armé au moyen de matériaux composites se sont révélés être nettement plus efficace et fiables, comparativement aux anciens procédés de renforcement.

ABSTRACT

Although some reinforced concrete structures remain undamaged under conditions severe weather and severe disorders occurring in the structures are often due to degradation of the materials used, or to change the functionality built (increasing operating loads).

After various investigations and diagnosis, and to remedy this problem it is absolutely essential to carry out repair methods are to be reinforcement. Techniques of building reinforced concrete structures using materials composites were found to be much more efficient and reliable, compared to former reinforcing processes.

ملخص

على الرغم من أن بعض المنشآت الخرسانية المسلحة لا تزال غير تالفة في ظل ظروف اضطرابات الطقس القاسي والشديد التي تحدث في الهياكل وغالبا ما تكون نتيجة لتدهور من المواد المستخدمة، أو لتغيير وظيفة المبنى (زيادة أحمال التشغيل).

بعد التحقيقات المختلفة والتشخيص، وعلاج هذه المشكلة هو ضروري للغاية لتنفيذ طرق الإصلاح و أن يكون تعزيز.

عززت تقنيات بناء الهياكل الخرسانية باستخدام المواد المركبة التي تم العثور عليها لتكون أكثر كفاءة وموثوق بها ، بالمقارنة مع سابق عمليات التعزيز.

Liste des figures

- Figure III-1 Onde longitudinale.
- Figure III-2 Onde transversale.
- Figure III-3 Effet de la différence de vitesse de propagation des ondes sur la forme d'onde. (a) onde au point d'émission (b) séparation de la composante longitudinale et transversale.
- Figure III-4 Onde de Rayleigh.
- Figure III-5 Ondes de Lamb symétriques (a) et antisymétriques (b).
- Figure III-6 : exemple d'émission par salves (gauche) et d'émission continue (droite).
- Figure III-7 : Courbe tension/temps d'un signal d'EA.
- Figure III-8 Représentation d'une salve d'émission acoustique sous forme d'un vecteur de ses paramètres représentatifs.
- Figure III-9 : Principe de la mesure par ultrason.
- Figure III-10 : Schéma de principe du Rebound Hammer.
- Figure III-11 : principe des mesures électriques.
- Figure III-12 : Variation de la résistance électrique d'un béton et de la contrainte appliquée en compression.
- Figure III-13 : Variation de la résistance électrique d'un béton en fonction des cycles de charge/décharge en compression.
- Figure III-14 Mesures en transparence.
- Figure III-15 Mesures en surface.
- Figure III-16 Mesures en transparence par rayonnement.
- Figure III-17 Points de mesures.
- Figure III-18 Élément à tester par le scléromètre.
- Figure III-19 Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil sur éprouvettes.
- Figure III-20 Grille de mesure sur ouvrage.
- Figure III-21 Grille de mesure sur éprouvette.
- Figure III-22 Résistance à la compression sur cube en fonction de la dureté au choc.
- Figure III-23 Courbes d'étalonnage pour bétons conservés à l'air.
-
- Figure IV-1 Réfection des bétons et protection des armatures.
- Figure IV-2 Renforcement au moyen de béton projeté.
- Figure IV-3 Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage).

Liste des figures

Figure IV-4 Organigramme du processus de chemisage en béton armé.

Figure IV-5 Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique.

Figure IV-6 Le renforcement au moyen de profilés métalliques.

Figure IV-7 Evolution du module d'Young avec la température.

Figure VI-8 Modèle idéalisé d'une surface réparée.

Figure VI-9 confinements d'un poteau au moyen de PRFC.

Figure VI-10 Renforcement de poteau : dans le sens longitudinal vis-à-vis de la flexion ; et dans le sens radial (confinement) vis-à-vis la compression.

Figure V-1 Modes de rupture de joints collés.

Figure V-2 Modes de sollicitation d'un joint cohésif.

Figure V-3 Configuration d'un essai classique d'arrachement.

Figure V-4 Dynamomètre de traction utilisé.

Figure V-5 La presse de compression utilisée.

Liste des tableaux

Tableau III-1 Influence des armatures L'axe de propagation étant perpendiculaire à l'axe des aciers.

Tableau III-2 Influence des armatures l'axe de propagation étant parallèle à l'axe des aciers.

Tableau III-3 Valeurs du coefficient d'influence du type de ciment.

Tableau III-4 Valeurs du coefficient d'influence du dosage en ciment.

Tableau III-5 Valeurs du coefficient d'influence de la nature des agrégats.

Tableau III-6 Valeurs du coefficient d'influence de la granulométrie.

Tableau III-7 Valeurs du coefficient d'influence de l'humidité du béton.

Tableau III-7 Valeurs du coefficient d'influence de la maturité du béton.

Tableau III-8 Valeurs du coefficient d'influence des adjuvants (approuver après une série de tests).

Tableau III-9 Moyens de mesure.

Tableau III-10 Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d'inclinaison.

Tableau III-11 Modèles des scléromètres existants.

Tableau III-12 Valeurs du coefficient C_c .

Tableau III-13 Valeurs du coefficient C_d .

Tableau III-14 Valeurs du coefficient C_m .

Tableau III-15 Valeurs du coefficient C_u .

Tableau IV-1 Propriétés des différentes fibres.

Tableau IV-2 Propriétés mécaniques des résines époxydes.

Chapitre I
INTRODUCTION GENERALE

I-1 INTRODUCTION :

Le béton ordinaire constitue certainement l'un des matériaux de construction les plus durables. Certains ouvrages demeurent en excellent état après plus d'un siècle d'exploitation sous des conditions climatiques particulièrement rigoureuses et sévères.

Il est quelquefois surprenant de constater que certains ouvrages récents présentent une détérioration importante, cela nécessitera une protection et une maintenance appropriée. Ces désordres rencontrés sont très souvent dus au vieillissement des matériaux, ce qui a une incidence directe sur la durabilité du béton.

Dans tous les cas, il est impérativement indispensable de procéder à des méthodes, soient de renforcement, soient de réparation, et cela suite à une inspection d'analyses et de méthodologie d'un bon diagnostic.

I-2 OBJECTIF :

L'objectif de ce travail est l'utilisation de la technique non destructive (ultrasonore et sclérométrie) pour mesurer la qualité de béton, des renforcements et réparations. Cette méthode peut s'avérer adéquate aussi bien en terme de temps d'intervention que d'économie des essais. La réflexion et la vitesse des ultrasons peuvent être utilisées pour qualifier la réparation et donner un diagnostic sur les réparations minces des bétons.

Chapitre II
PATHOLOGIE DES OUVRAGES
EN BETON ET METHODOLOGIE
D'UN DIAGNOSTIC

II-1 INTRODUCTION :

A coté des phénomènes d'altération du béton armé qui peuvent être aggravés par une mise en œuvre défectueuse (enrobage insuffisant, mauvais choix de liants hydrauliques, de granulats ou d'adjuvants ...), la pathologie des ouvrages en béton armé se manifeste principalement par la fissuration excessive, la déformation exagérée ou la rupture d'éléments.

II-2 LA FISSURATION DES OUVRAGES : [THUMMEN F, 2004]

La fissuration du béton armé peut avoir deux origines bien distinctes et indépendantes l'une de l'autre :

□□ La fissuration liée à la mise en œuvre et à la qualité du matériau : fissuration accidentelle

□□ Les fissurations liées au fonctionnement de l'ouvrage : fissuration fonctionnelle mécanique ou thermique.

Avant d'envisager le traitement des fissures, il est impératif d'en déterminer l'origine. Les fissures ne sont en effet que la manifestation de phénomènes dont il faut mesurer la gravité.

II-2-1 FISSURATION ACCIDENTELLE :

Les principales causes de fissurations accidentelles (précoce ou plus tardive) sont :

a) **Le ressuage** : l'exsudation superficielle d'une partie de l'eau de gâchage à la surface du béton frais s'accompagne d'un tassement qui peut créer des fissures au droit des obstacles s'opposant au mouvement, tel que les armatures et les variations d'épaisseur notamment.

L'ouverture de ces fissures peut atteindre plusieurs millimètres et entraîner la corrosion des armatures.

b) **Le retrait plastique** : l'ordre de grandeur du retrait plastique est de 1 à 5 mm par mètre selon la vitesse d'évaporation de l'eau du béton.

La fissuration plastique affecte les bétons de qualité médiocre.

c) **Le retrait thermique** : après la prise, le refroidissement du béton se traduit donc par un retrait thermique qui peut provoquer l'apparition de fissures.

d) Le retrait hydraulique :

Ce retrait différé s'exerce sur une période de 1 à 2 ans après la mise en œuvre. Il est directement lié au départ de l'eau libre du béton (excédant d'eau de gâchage nécessaire à l'ouvrabilité du béton mais n'entrant pas dans sa constitution) dans le temps. Ce retrait se produit d'autant plus lentement que les pièces sont massives et que l'humidité ambiante est élevée.

Les fissures liées aux quatre premières causes apparaissent entre les premières heures et les premiers mois d'existence du béton. Les fissures accidentelles n'ont en elles-mêmes aucun caractère de gravité. Elles peuvent cependant avoir des conséquences néfastes sur les ouvrages eux-mêmes ou les éléments qui leur sont associés :

- ☐☐ Corrosion des armatures si leur ouverture est importante.
- ☐☐ Infiltrations d'eau, notamment si elles sont traversantes.
- ☐☐ Désordres causés à des revêtements rapportés.

II-2-2 FISSURATION FONCTIONNELLE MECANIQUE

Le principe même du fonctionnement des ouvrages en béton armé est basé sur la médiocre résistance du béton en traction. Celle-ci est compensée par les armatures placées dans les zones tendues. La sollicitation des armatures en traction suppose donc la fissuration du béton.

Lorsque les fissurations sont conformes au schéma de calcul, il n'y a pas de danger ni de désordre. Les fissures fonctionnelles d'un ouvrage en béton correctement dimensionné et mis en œuvre sont par nature compatibles avec un bon comportement. La seule anomalie peut donc provenir d'une ouverture excessive des fissures qui indique obligatoirement le dépassement des sollicitations prises en compte.

Lorsque la fissuration n'est pas conforme au schéma de calcul, on peut conclure à priori à une conception, une mise en œuvre ou un usage défectueux. Cela concerne généralement un mauvais positionnement des armatures, une sollicitation excessive du béton en compression, des dispositions constructives inadéquates ou des sollicitations non prises en compte dans les hypothèses de calcul (surcharges exagérées, tassement de fondations, poussées et tractions au niveau d'éléments structurels).

Il est également possible que la modélisation choisie pour le calcul des ouvrages ne soit pas représentative du fonctionnement réel. Cela se produit notamment lorsque des reports de charges intéressent des éléments de raideurs très différentes. Les éléments les plus raides (de plus forte inertie ou de plus

faible portée) reprennent alors des charges pouvant être beaucoup plus importantes que prévu.

II-2-3 FISSURATION FONCTIONNELLE THERMIQUE :

La plupart des ouvrages en béton armé sont soumis à des variations de température qui se traduisent par des dilatations et des rétractions. Lorsque ces mouvements sont gênés ou empêchés par des éléments de structure raides, ou lorsque les joints de dilatation sont trop espacés, les raccourcissements s'effectuent au prix de fissures.

II-3 LA RUPTURE DES ELEMENTS EN BETON ARME : [SOUTSOS M, et al 2009]

Les causes de rupture d'éléments en béton armé sont souvent les mêmes que celles qui induisent des déformations excessives :

- ☐☐ Sollicitations de calcul largement dépassées
- ☐☐ Sous dimensionnement des éléments
- ☐☐ Affaiblissement de la section du béton et des armatures du à la corrosion
- ☐☐ Mauvais positionnement des armatures

Les ruptures peuvent aussi se produire brutalement, sans prévenir par des déformations décelables :

- ☐☐ Rupture au cisaillement par efforts tranchant
- ☐☐ Rupture en traction

II-4 LES INVESTIGATIONS DANS LE BETON : [DGFZP, 2003]

II-4-1 PREAMBULES :

Le béton armé est un composant mixte, dont l'évaluation des caractéristiques est complexe.

Le diagnostic est le résultat d'investigations effectuées pour se prononcer sur l'état d'une construction et ses conséquences.

Lors d'un diagnostic, on cherche à déterminer la résistance du béton, sa fissuration, la constitution et l'enrobage des armatures, etc.

Le déroulement du diagnostic comporte quatre volées :

- 1) Un *examen visuel* ou morphologique.
- 2) Des *mesures* sur site au moyen d'appareillages spécifiques.
- 3) L'*analyse technique* des mesures effectuées.
- 4) La *formulation* des conclusions et recommandations techniques.

Cependant, un diagnostic reste une approximation plus ou moins précise où il est rarement possible d'obtenir un recueil exhaustif des données.

II-4-2 EXAMEN VISUEL OU MORPHOLOGIQUE :

L'examen visuel est la forme d'investigation la plus simple et la plus économique. Dans un premier temps, il s'agit de définir un éventuel programme d'investigation à envisager pour affiner un éventuel diagnostic.

Quel que soit leur origine, ces informations doivent être utilisées avec prudence, et surtout pas comme des données de base du diagnostic ; elles sont plutôt à considérer comme des éléments de recoupement des constats ou comme des sources d'indication sur la manière d'orienter le diagnostic ; ces informations sont obtenues par :

- ☐☐ Une prise de photos.
- ☐☐ Une identification et localisation des zones fortement sollicitées.
- ☐☐ Une observation de zones critiques telles : jonctions, appuis, etc...
- ☐☐ La localisation des fissures.

II-5 MESURES IN-SITU : [SHINOMIYA T, et al 2002] [SUARIS W, et al. 1995]

La détermination des caractéristiques pour un niveau d'existence, de position des armatures, de dureté du béton, de degré de corrosion et d'oxydation des armatures, et on peut déjà conclure sur :

- ☐☐ L'homogénéité de l'état des lieux ou sur l'existence de plusieurs cas de figures bien distincts.
- ☐☐ La nature et la localisation des désordres.
- ☐☐ Des anomalies de fonctionnement vétustes, non conformes à la réglementation en vigueur.
- ☐☐ La localisation des sondages et des prélèvements à effectuer.
- ☐☐ L'ouverture des fissures dans le béton.

Les principales mesures in-situ pour diagnostiquer un béton d'ouvrage sont :

Le scléromètre

Cet instrument relativement simple à l'origine, permet d'estimer la résistance du béton, mesure la dureté superficielle du béton par rebondissement d'une masselotte.

Il est nécessaire de procéder à une quinzaine d'essais sur chaque zone testée pour déduire une valeur moyenne représentative.

Le scléromètre est un instrument particulièrement performant pour préciser l'homogénéité de la résistance du béton aux différents points d'une structure, mais l'information sur le béton reste imprécise par cette méthode.

L'auscultation par ultrasons

Cette méthode permettent d'estimer la résistance d'un béton ou de détecter la présence de microfissures interne, c'est une corrélation entre la résistance, la vitesse du son V_L , la compression R_c , et le module d'élasticité. On se développera dans le chapitre suivant ces deux techniques.

Chapitre III
TECHNIQUES DE DIAGNOSTIC PAR
LES ULTRASONS ET LE
SCLEROMETRE

CARACTERISATION NON-DESTRUCTIVE DE L'ENDOMMAGEMENT

METHODE ULTRASONORE : (théorie des ultrasons) [C.N.E.R.I.B 2004]

Cette partie présente les bases de la propagation des ondes, de l'émission acoustique, et du traitement informatique du signal.

III-1 LES ONDES :

Il existe deux principaux types d'onde acoustique, les ondes transversales et les ondes longitudinales. Les ondes longitudinales ont une oscillation parallèle à la direction de propagation (Figure III-1), et les ondes transversales perpendiculaire à la direction de propagation (Figure III-2). La vitesse des ondes transversales est généralement une fois et demie plus faible que celle des ondes longitudinales

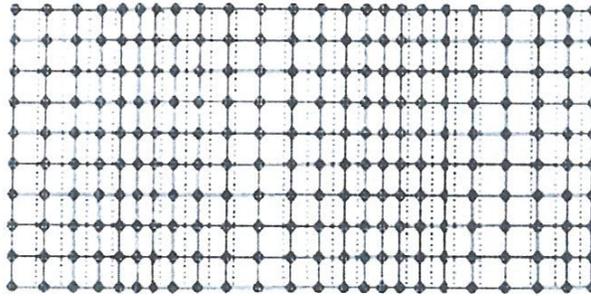


Figure III-1 Onde longitudinale

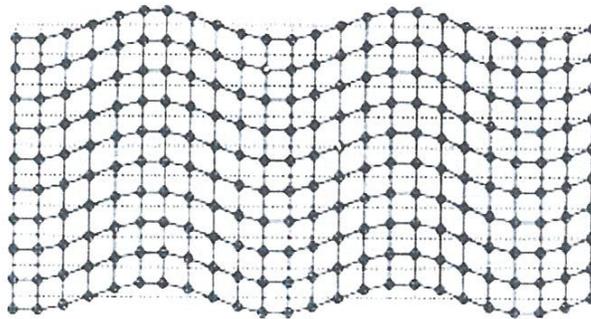


Figure III-2 Onde transversale

Une onde quelconque est constituée d'une composante transversale et d'une composante longitudinale, chacune des composantes se déplaçant à sa propre vitesse. Ainsi, après un certain temps de parcours, une onde peut être détectée comme deux ondes différentes, une transversale et une longitudinale (Figure III-3).

III-2 EMISSION ACOUSTIQUE :

III-2-1 INTRODUCTION : [BEATTIE A.G, 1983]

L'émission acoustique (EA) peut être définie comme les ondes acoustiques générées par un alliage d'aluminium. Matériau soumis à une force extérieure. Selon l'AFNOR, « le phénomène d'émission acoustique correspond à un phénomène de libération d'énergie élastique sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau ayant des processus dynamiques de déformation ».

Actuellement, l'émission acoustique est utilisée pour la détection de défauts, la recherche expérimentale sur des matériaux dans de nombreux domaines et la prévision de rupture de structures. L'une des premières utilisations de l'émission acoustique est reportée par Portevin et Le Chatelier lors de l'apparition de bandes de Lüders durant un essai de traction sur un alliage d'aluminium.

III-2-2 PRINCIPES DE L'EMISSION ACOUSTIQUE : [NONNET E, et al, 2000]

Le signal d'émission acoustique est un signal électrique produit par un capteur en réponse à une onde d'émission acoustique. La forme de ce signal dépendra du mécanisme qui a créé l'onde acoustique, des propriétés du matériau dans lequel l'onde se propage, de la distance de propagation et du capteur qui transforme l'onde en signal électrique. En émission acoustique, l'opérateur n'a pas de contrôle sur les mécanismes d'émission mais peut seulement soumettre le matériau à des sollicitations extérieures qui vont engendrer les mécanismes d'émission acoustique. Les différents mécanismes à l'origine de l'émission acoustique peuvent être la rupture de cristaux, la nucléation/croissance de défauts, les mécanismes de dislocations, les transformations de phases, etc. Deux types d'émission peuvent être générés, les émissions par salves ou émission acoustique de type discrète et les émissions continues (Figure III-6) L'émission continue étant une suite rapide d'émission par salves. L'amplitude de l'émission continue est généralement plus faible que celle de l'émission par salves.

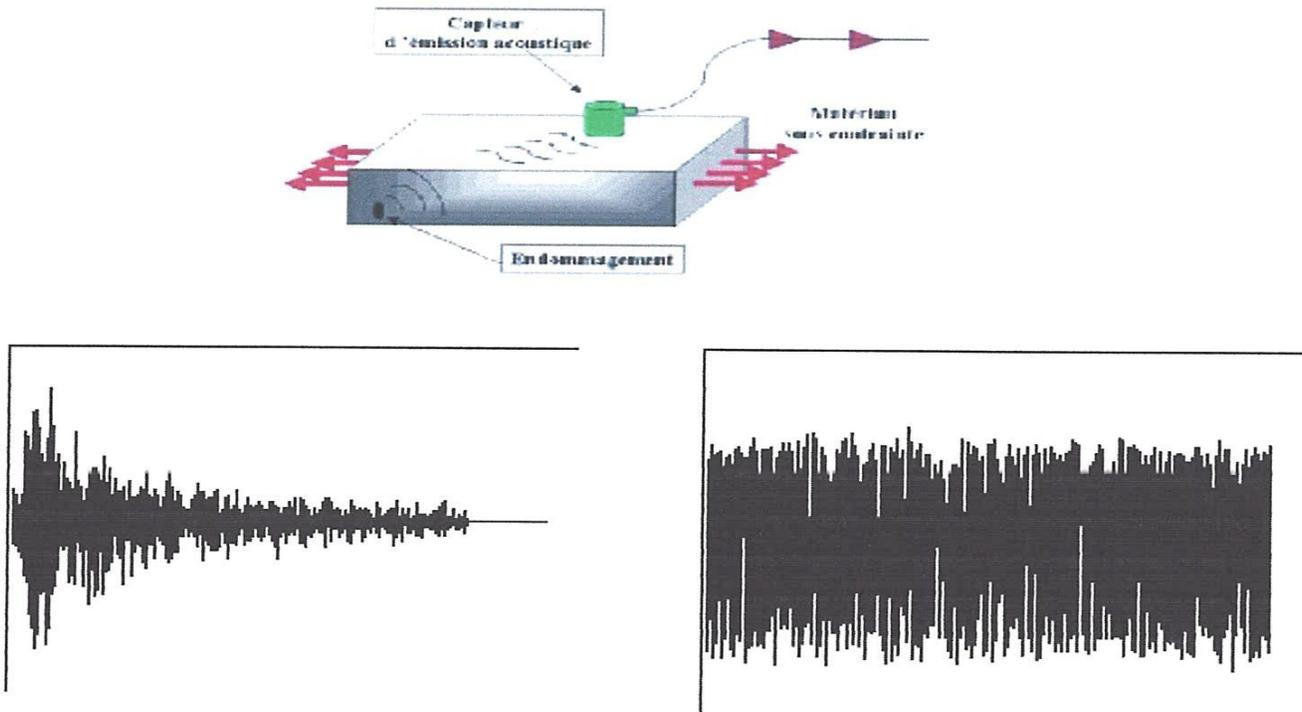


Figure III-6 : exemple d'émission par salves (gauche) et d'émission continue (droite)

III-2-3 CAPTEURS : [MALISZKIEWICZ P, 1996]

Un capteur génère un signal électrique quand il est stimulé par une onde acoustique. La relation exacte entre le signal électrique et l'onde acoustique dépend des caractéristiques du capteur et de l'onde. Un capteur idéal produit une courbe « tension/temps » identique à la courbe amplitude/temps de l'onde au point où se trouve le capteur. Cependant, la plupart des capteurs ne fonctionnent correctement que pour certaines bandes de fréquence et pour certains types d'ondes. Les signaux d'émission acoustique mettant en œuvre une large gamme de fréquences et différents types d'ondes, le choix d'un capteur n'est généralement pas critique pour détecter l'émission acoustique. Les capteurs d'émission acoustique utilisent différentes technologies mais les plus utilisés sont les capteurs piézo-électriques fabriqués à partir de céramiques ferroélectriques. Ils piézo-électriques ont une température appelée température de Curie au-dessus de laquelle le matériau se transforme en un autre généralement non ferroélectrique. Le capteur perd alors sa polarisation et n'est plus utilisable. La température de Curie d'une céramique piézo-électrique se situe généralement entre 300 et 400°C, mais les autres composants des capteurs ne supportent généralement pas ces températures. Si on veut utiliser l'émission acoustique sur

un échantillon à haute température ou pendant une montée en température, il faut utiliser un guide d'onde qui isole le capteur des variations thermiques. Le guide d'onde sert d'interface entre le capteur et l'échantillon. La partie en contact avec l'échantillon est à haute température alors que la partie en contact avec le capteur est à température ambiante. Le guide d'onde doit donc résister aux températures d'essais et ne pas trop atténuer le signal. En général, l'utilisation d'un guide d'onde induit de nouvelles réflexions aux interfaces échantillon/guide d'onde et guide d'onde/capteur ainsi qu'une déformation du signal qui rend la localisation plus difficile

III-2-4 COUPLANTS : [LANDIS, 1999]

Lorsque le capteur est posé directement en contact avec la surface du matériau, le contact est très mauvais et le signal fourni par le capteur est très faible. Si on met une fine couche de fluide entre le capteur et le matériau, on obtient un signal beaucoup plus intense. Physiquement, ceci s'explique si on considère l'onde acoustique comme une onde de pression transmise entre deux surfaces en contact. D'un point de vue microscopique les deux surfaces sont considérées comme très grossières et il n'y a que quelques points de contact entre les deux surfaces. La contrainte est une force par unité de surface et dans ce cas la surface transmettant la force est très faible. Si les interstices microscopiques sont remplis avec un fluide, la pression sera transmise uniformément entre les deux surfaces. En général un couplant permet d'avoir une augmentation du signal de 30 dB par rapport au signal obtenu sans couplant. La solution la plus pratique est d'utiliser un couplant fluide qui mouille les deux surfaces, le capteur devant être maintenu en place sur l'échantillon par un système de fixation (magnétique, mécanique...)

III-2-5 CARACTERISTIQUES DU SIGNAL : [SUZUKU H et al, 1996] **paramètres exploitables**

Un exemple de courbe tension/temps d'un signal d'émission acoustique est représenté (Figure III-7), qui représente une salve d'émission acoustique. Le seuil est le niveau qui permet à l'appareil d'EA de faire la différence entre le bruit de fond et le signal réel, il peut être exprimé en dB ou en volt. Les différents paramètres exploitables sont représentés sur cette figure

- Le nombre de coups est le nombre de fois où la salve d'EA franchit le seuil.
- L'amplitude est la valeur maximale atteinte par la salve, exprimée en dB
- La durée est le temps entre le premier et le dernier dépassement de seuil.

• Le temps de montée est le temps entre le premier dépassement de seuil et l'amplitude maximale

D'autres paramètres sont aussi étudiés comme la fréquence du signal ou l'énergie calculée à partir de l'aire sous la courbe. Tous ces paramètres, sauf l'amplitude, sont fortement dépendants de la valeur du seuil, qui devra donc être choisi avec soin

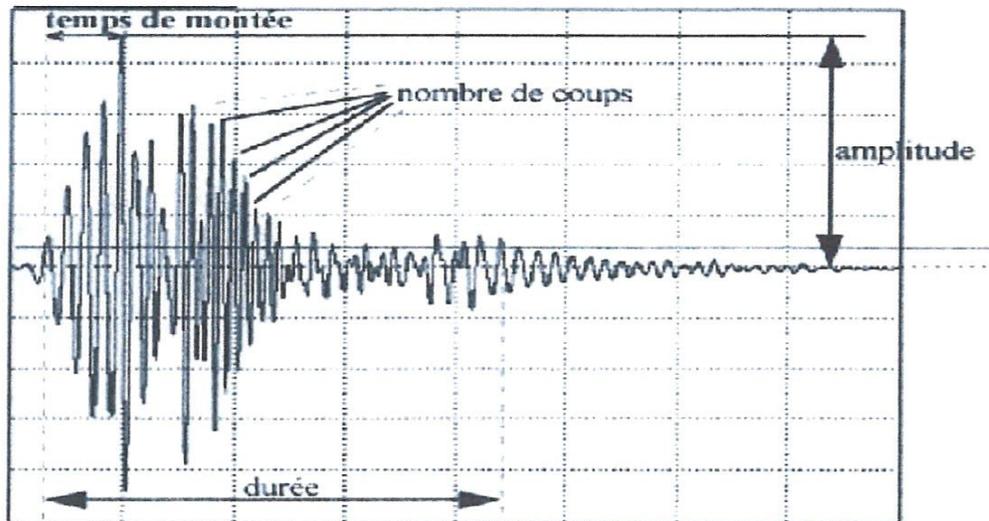


Figure III-7 : Courbe tension/temps d'un signal d'EA

III-2-6 LOCALISATION : [TERRIEN M, 1980]

La localisation des événements de l'émission acoustique sert à déterminer le point ou la zone où a eu lieu l'EA. Elle peut se faire en utilisant deux capteurs ou plus. Dans le cas d'un essai sur une éprouvette de traction, compression ou de flexion, deux capteurs permettent d'avoir une localisation linéaire.

Dans le cas de deux capteurs, l'algorithme de calcul de la localisation reste assez simple. Le logiciel connaît la distance entre les deux capteurs et la vitesse de propagation de l'onde dans le matériau (déterminée préalablement). En fonction des différences de temps d'arrivée de l'onde sur chaque capteur, le logiciel détermine la localisation de la salve. Pour les mailles de localisation plus complexes, on utilise les méthodes usuelles de triangulation à partir des temps d'arrivée sur plusieurs capteurs.

Une autre possibilité consiste à utiliser l'atténuation du signal. Une maille de localisation avec laquelle on mesure l'amplitude du signal à chaque capteur permet de déterminer la position de la source à condition de connaître la loi d'atténuation dans le matériau étudié.

Cette méthode sera donc difficilement utilisable dans les matériaux tels que les métaux pour lesquels l'amortissement est faible ($<3\text{dB.m}^{-1}$). Inversement elle est envisageable pour des matériaux amortissant tels que les composites, dans lesquels l'atténuation peut atteindre 50dB.m^{-1} . Toutefois, les composites étant des matériaux hétérogènes et anisotropes, la diffusion et la dispersion des ondes acoustiques sont telles qu'une localisation ponctuelle de la source devient très complexe, si les lois de variation de la vitesse et/ou de l'atténuation des ondes en fonction de la direction de propagation sont méconnues.

Pour des géométries plus complexes une localisation avec plus de deux capteurs est nécessaire. Avec un grand nombre de capteurs (au moins 6), un code de calcul adapté comme SIGMA (Simplified Green's function for Moment tensor Analysis) permet de déterminer le type de fissure et son orientation. Plus le nombre de capteurs est important et plus l'algorithme de dépouillement des résultats est complexe

III-2-7 EFFET KAISER : [NIISEKI S et al, 1995]

L'effet Kaiser représente la capacité d'un matériau hétérogène à garder et reproduire des informations sur les contraintes qu'il a subies dans le passé. Cet effet peut être observé lors de l'application d'une charge cyclique sur un matériau avec augmentation de la charge à chaque cycle. On a alors, pour chaque cycle, apparition de l'EA pour des charges supérieures à la charge maximale du cycle précédent. Dans le cas où la reprise d'EA se fait avant cette charge, on parle de rapport « Felicity » qui est le rapport entre la charge où l'EA a repris et la charge maximale précédemment atteinte. Cet effet permet de connaître, à un moment donné, la contrainte maximum subie par le matériau au cours de son utilisation précédente

III-2-8 ANALYSE STATISTIQUE MULTI-VARIABLES : [ASTM, 1991]

La plupart des techniques d'analyse de l'émission acoustique prennent en compte un paramètre donné d'une salve ou sa représentation cumulée en fonction du temps ou d'autres paramètres (contrainte, déformation, ...). S'il est possible d'afficher simultanément à l'écran de nombreuses fenêtres pendant l'essai, les dépouillements sont très longs et il est toujours possible de passer à côté d'une corrélation significative. Des techniques d'analyses multi-variables ont été développées en parallèle avec les progrès de l'informatique pour repérer plus rapidement les paramètres significatifs et classer les événements d'EA en différentes familles. Diverses méthodes mathématiques permettent l'analyse statistique de données selon plusieurs paramètres. En effet, il est nécessaire

après collecte d'informations de disposer de méthodes permettant de définir les ressemblances ou les différences entre les données en analysant non pas un paramètre caractéristique mais n paramètres. L'extraction, parmi de grandes quantités de données, de critères de reconnaissance de classes est le principe fondamental de disciplines très variées telles la reconnaissance d'écriture, la bio-reconnaissance, l'analyse des données météorologiques, la prévision de faillites d'entreprises, la classification de documents...

Différentes techniques peuvent être utilisées comme l'analyse en composante principale les k -moyennes, les k « plus proches voisins » ou encore les réseaux de neurones. Nous développerons ici les k -moyennes et les k « plus proches voisins »

La technique d'analyse des k -moyennes (MacQueen 1967) est une technique non supervisée. L'utilisateur doit seulement faire l'hypothèse du nombre de classes avant de faire la classification. Elle est très simple à mettre en œuvre et très utilisée. C'est une méthode itérative de partition des données. Il est seulement nécessaire de connaître le nombre de classes k que l'on désire obtenir au terme du groupement. Cette procédure consiste en une succession d'étapes après enregistrement de chaque salve sous forme d'un vecteur de ses paramètres représentatifs (Figure III-8) :

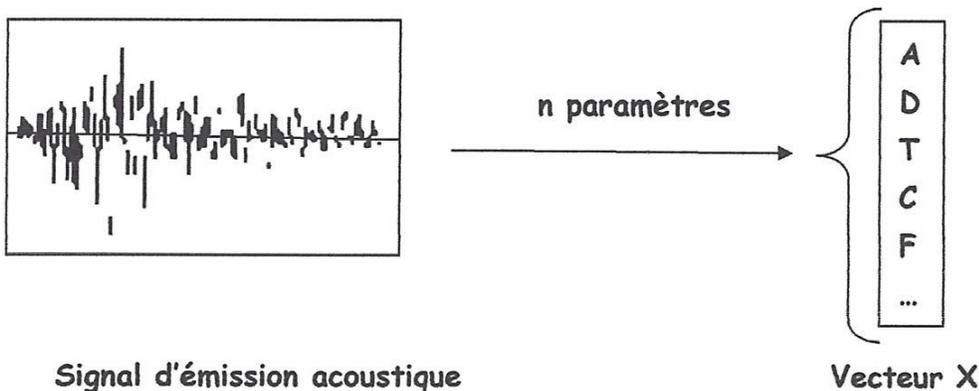


Figure III-8 Représentation d'une salve d'émission acoustique sous forme d'un vecteur de ses paramètres représentatifs

- 1- Choix du nombre k de classes.
- 2- Initialisation des centres des k classes de façon aléatoire ou en les définissant manuellement.
- 3- Calcul de la distance euclidienne séparant chaque vecteur X au centre des k classes.

- 4- Affectation des vecteurs X à une des k classes en recherchant le minimum de la distance euclidienne entre le vecteur X et les centres des k classes.
- 5- Evaluation des nouveaux centres des k classes.
- 6- Si les centres des classes sont stables, alors l'algorithme a convergé et la procédure est terminée. Sinon on répète les opérations 3 à 5.

La méthode des K « plus proches voisins » (K-PPV) consiste à comparer les signaux inconnus à une base de données de signaux connus et classés. Cette méthode de classification ne nécessite pas de phase d'apprentissage. C'est une méthode supervisée où l'on connaît à l'avance le nombre de classes et les signaux caractéristiques de chaque classe. La distance entre l'objet à classer et tous les vecteurs de l'échantillon d'apprentissage est calculée. La classe assignée à l'objet est la classe majoritaire rencontrée parmi les prototypes les plus proches. Il est nécessaire, pour cette technique, de déterminer la valeur de k (plus proches voisins) optimale permettant la meilleure classification possible. Dans le cas d'un problème à deux classes, on choisira une valeur de k impaire pour éviter les indécisions.

III-3 PROPAGATION DES ONDES ULTRASONORES : [ELVERY R.H et al, 1969]

La différence fondamentale entre l'émission acoustique et les mesures ultrasonores est que la première est générée par le matériau lui-même alors qu'avec la seconde technique, l'onde acoustique est générée par une source extérieure et transférée dans le matériau. La propagation des ondes ultrasonores est utilisée comme technique non destructive de contrôle des matériaux et de suivi de leur endommagement. Cette technique consiste à envoyer une onde ultrasonore intense de courte durée et de fréquence comprise entre quelques kHz et quelques MHz à travers le matériau. 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 (Figure 9). La vitesse de propagation d'une onde dans un même matériau étant constante, l'analyse temporelle des signaux permet une localisation en profondeur du réflecteur (défaut, fond de la pièce...)

L'onde ultrasonore est généralement émise et détectée par des transducteurs piézoélectriques liés au matériau par un couplant. Le même transducteur peut servir à la fois d'émetteur et de récepteur (pulse/echo mode). Cette technique est utilisée quand le matériau n'est pas trop dispersif, quand son épaisseur est faible ou quand un seul côté du matériau à tester est accessible. L'utilisation de deux transducteurs pour l'émission et la réception se

fait généralement si le matériau atténue beaucoup le signal ou s'il est très dispersif (transmission mode), dans ce cas, deux côtés opposés du matériau à tester doivent être accessibles. La localisation temporelle des échos est utilisée pour détecter un défaut dans une pièce en faisant un "scan" sur toute sa surface ou pour vérifier son épaisseur. Cette technique est très utilisée car elle est facile d'emploi et permet un dépouillement rapide des résultats, contrairement à l'émission acoustique.

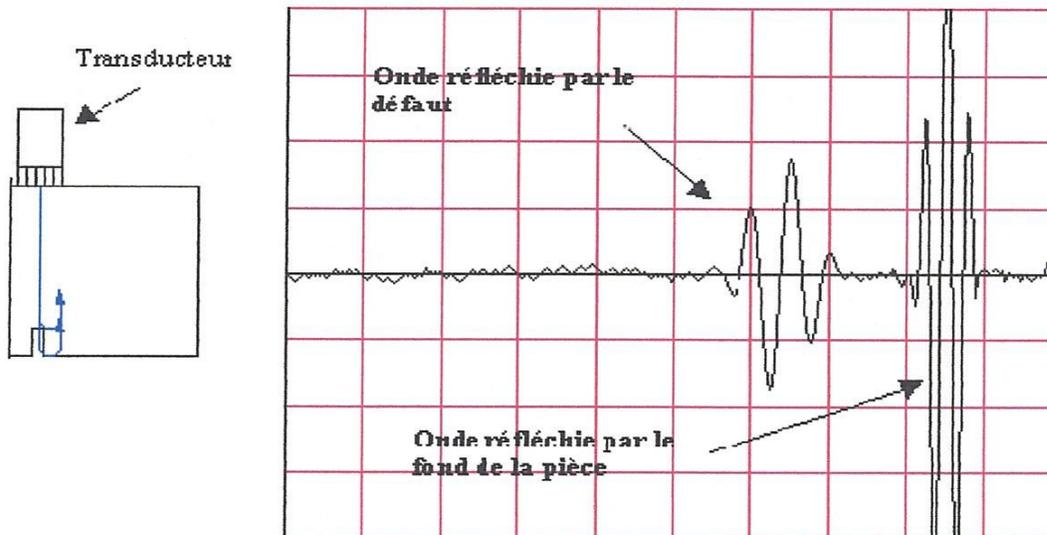


Figure III-9 : Principe de la mesure par ultrason

D'après [LI F et al, 2000] la vitesse de l'onde dans le matériau est le paramètre le plus facile à mesurer. Elle permet entre autres de calculer les valeurs du module élastique, dans un matériau isotrope fini, par les relations :

$$E = \rho V_L^2$$

E : module de Young, ρ : densité de l'éprouvette, V_L : vitesse de propagation de l'onde longitudinale ultrasonore

$$G = \rho V_T^2$$

G : module de cisaillement, ρ : masse volumique du matériau, V_T : vitesse de propagation de l'onde transversale ultrasonore

En utilisant les valeurs des vitesses des ondes transversales et longitudinales, on peut déterminer le coefficient de Poisson par la relation :

$$\nu = \frac{1 - 2 \frac{V_T^2}{V_L^2}}{2 \left(1 - \frac{V_T^2}{V_L^2}\right)}$$

ν : Coefficient de Poisson, V_L : vitesse de propagation de l'onde longitudinale ultrasonore

V_T : vitesse de propagation de l'onde transversale ultrasonore

Les différents paramètres mesurés de l'onde ultrasonore ne peuvent généralement pas être utilisés directement. C'est une technique comparative. On étudie en général l'évolution de la vitesse de propagation des ondes (mesure de modules) ainsi que l'atténuation du signal à travers le matériau au cours d'un essai. L'évolution de ces paramètres donne une information sur l'endommagement du matériau.

Cette technique a notamment été utilisée pour suivre l'endommagement de bétons de génie civil soumis à des cycles de gel/dégel, pour suivre l'endommagement par chocs thermiques successifs ou pour suivre la variation du module d'Young en fonction de la température. Des mesures de vitesse de propagation ainsi que des mesures de l'atténuation du signal ont permis à Akhras de suivre l'endommagement d'un béton, soit par mesure de la variation du module d'Young ou par le suivi de l'atténuation du signal. Chaque technique présente une sensibilité différente. La mesure de la vitesse de propagation du signal ou du module d'Young est plus sensible aux forts endommagements (nombres de cycles élevés de gel/dégel). La variation de l'énergie du signal permet de détecter les faibles endommagements (nombres de cycles faibles).

AUTRES TECHNIQUES DE CARACTERISATION NON-DESTRUCTIVE

III-4 REBOUND HAMMER : [KOLAITI E et al, 1993]

L'essai dit de « rebound hammer » consiste en un piston de métal comprimé par un ressort qui est automatiquement libéré au contact de la surface à tester. Le rebond est mesuré par une échelle graduée sur l'appareil (Figure III-10). Le rebound hammer a été initialement développé pour mesurer la résistance du béton après la prise, puis fut adapté à la mesure de la résistance en compression des matériaux rocheux.

Le test est basé sur la mesure de l'énergie restituée après rebond du piston à la surface du matériau, c'est à dire la différence entre l'énergie fournie par le

ressort et celle dissipée par déformation plastique du matériau. La distance parcourue par le piston au rebond, exprimée en pourcentage de la détente du ressort, représente la valeur du rebond et sert de comparaison entre les essais.

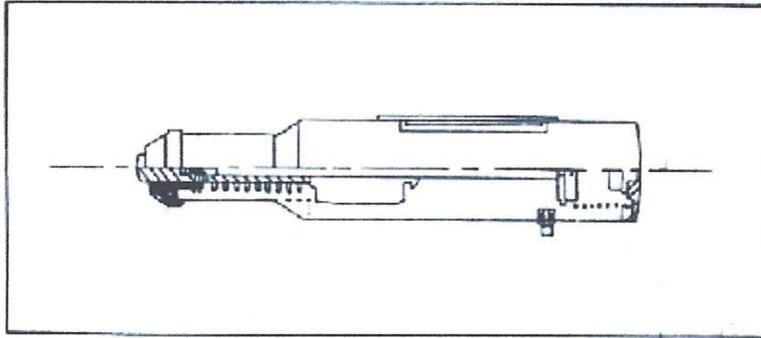


Figure III-10 : Schéma de principe du Rebound Hammer

La valeur du rebond permet de calculer la résistance en compression du béton. Mais cette relation est fortement dépendante des conditions de vieillissement de celui-ci et du type d'agrégats, limitant l'essai à une mesure approximative de la résistance en compression. Cette technique donne, de plus, seulement des informations sur une surface réduite du matériau et plusieurs essais doivent être effectués pour caractériser totalement une pièce. Certaines précautions doivent être prises durant le test. La surface à tester doit être lisse et ne présenter aucune aspérité, trou ou fissure et le matériau doit être homogène sur une profondeur de plusieurs centimètres. Dans le cas contraire, le matériau doit être poncé pour avoir une surface lisse. Du fait de la conception du marteau, la gravité influe sur la valeur du rebond et les essais doivent être effectués avec la même position du marteau (horizontale ou verticale) pour pouvoir être comparés entre eux. Il existe cependant des tables de corrections pour ramener les valeurs à une valeur équivalente prise avec le marteau horizontalement

Toutes ces contraintes font que ce principe peut seulement être utilisé pour vérifier l'homogénéité d'un bloc de béton sain après la prise mais qu'il peut difficilement permettre de suivre l'endommagement du matériau. La littérature ne présente d'ailleurs que des essais de contrôle ponctuel de matériaux mais pas de suivi ou mesure de l'endommagement.

III-5 MESURE ELECTRIQUE : [HAMMOND E et al, 1955]

Cette technique est souvent utilisée dans les composites à fibres de carbone où les fibres servent de renfort et de détecteur. Elle nécessite des matériaux conducteurs, comme les fibres de carbone, les ciments humides ou à base de carbure de silicium. Dans le cas des ciments, la technique consiste à faire passer un courant connu à travers l'échantillon par l'intermédiaire d'électrodes et à mesurer la tension obtenue. La résistance est calculée en utilisant la loi d'Ohm $U = RI$ (Figure III-11). Cette technique permet de mesurer simplement la variation de la résistance électrique d'un matériau pendant, par exemple, un essai de compression et de suivre son endommagement avec la variation de la résistance électrique. En effet, quand le matériau va s'endommager par micro puis macro-fissuration, le chemin à parcourir par le courant va être plus grand et la résistance sera augmentée. Plus l'endommagement sera important et plus le chemin parcouru par le courant sera long.

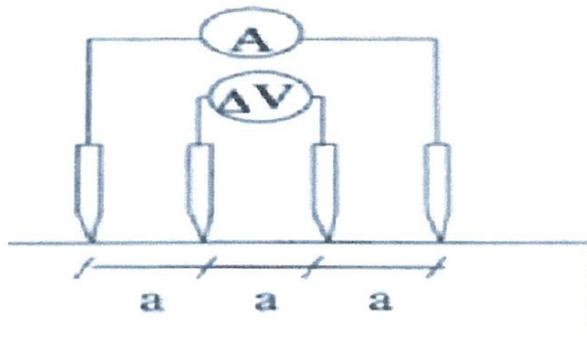


Figure III-11 : principe des mesures électriques

Dans le cas des bétons ont étudié la variation de la résistance électrique d'un béton de génie civil soumis à des cycles de compression (Figure III-12). Ils observent une augmentation de la résistance au premier cycle, attribuée à l'endommagement du matériau puis, pour chaque cycle suivant, une baisse de la résistance électrique durant la montée en charge suivie d'une nouvelle hausse à la décharge. La baisse de la résistance électrique durant la montée en charge traduit la « guérison » du matériau due à la fermeture des microfissures. Durant l'essai, la résistance électrique moyenne du matériau augmente continuellement, traduisant son endommagement (Figure III-13). Cette hausse de la résistance électrique est importante pour les premiers cycles puis diminue avec le nombre de cycles mais est toujours présente, traduisant un endommagement irréversible. De même, l'amplitude de la baisse de résistance durant la charge augmente avec le nombre de cycles. Dans ce cas la résistance électrique moyenne

et l'amplitude de la variation de résistance électrique durant un cycle peuvent permettre de suivre l'endommagement du matériau.

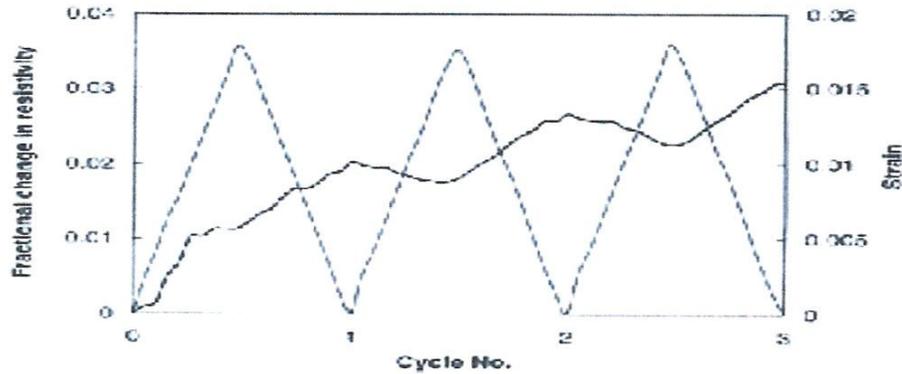


Figure III-12 : Variation de la résistance électrique d'un béton et de la contrainte appliquée en compression

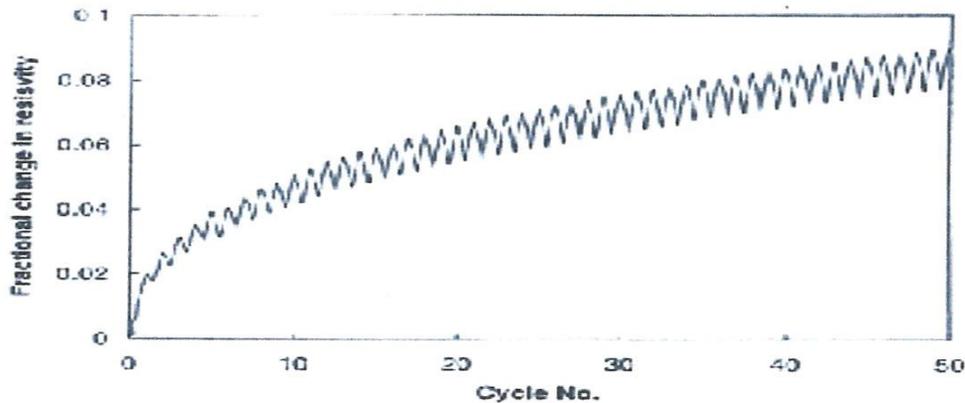


Figure III-13 : Variation de la résistance électrique d'un béton en fonction des cycles de charge/décharge en compression

Cette technique permet de suivre l'endommagement en continu ou ponctuellement mais ne peut être utilisée qu'avec des matériaux conducteurs électriquement, ce qui exclut la plupart des réfractaires après cuisson. De plus, son utilisation est limitée aux petites structures ou à des mesures locales.

III-9-2 MESURES EN SURFACE

Utilisées sur tous les éléments de structure et sur éprouvettes, plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur.

L'émetteur est maintenu en un point fixe ; le récepteur est déplacé successivement à des distances marquées à l'avance.

Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.

Après avoir porté graphiquement les temps et les distances, on trace la droite moyenne de ces différents points dont la pente correspond à la valeur de la vitesse du son dans le milieu considéré.

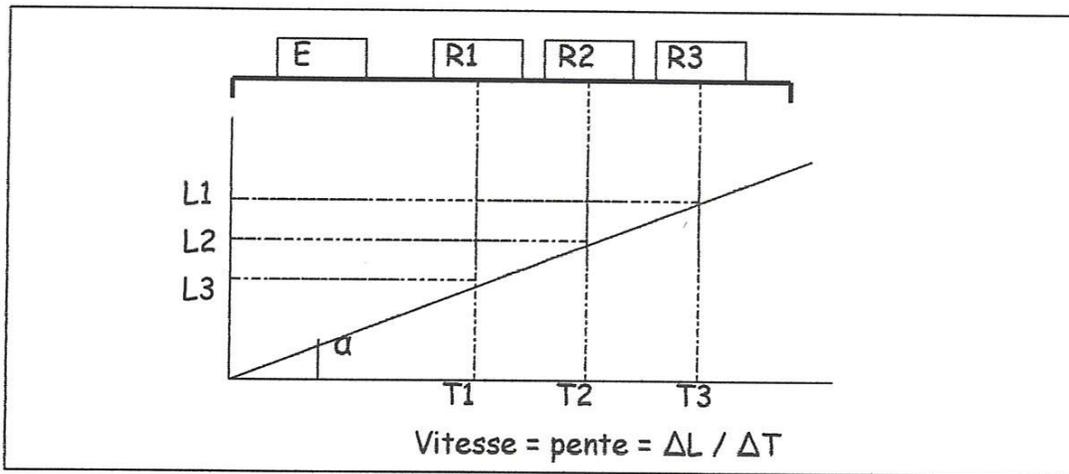


Figure III-15 Mesures en surface

III-9-3 MESURES EN TRANSPARENCE PAR RAYONNEMENT

Cette méthode consiste à placer l'émetteur en un point fixe, et sur la face opposée ou perpendiculaire, on déplace à intervalle constant le récepteur sur une ligne.

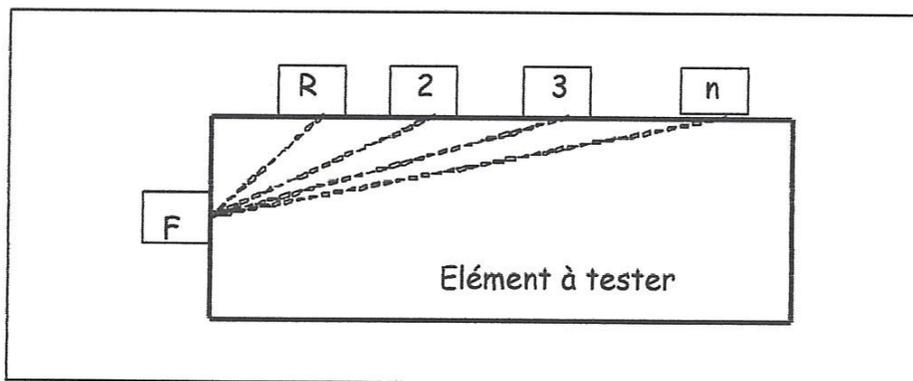


Figure III-16 Mesures en transparence par rayonnement

III-10 MODE OPERATOIRE : [PAPARGYRIS A.D et al, 2001]

III-10-1 PREPARATION DE L'ELEMENT

Pour qu'il y ait un contact parfait entre le béton et les transducteurs, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester.

Les matériaux d'interposition sont la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

III-10-2 POINTS DE MESURES

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage testé. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, ...) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5 m, le cas des petits éléments (poteaux, poutres...) les mesures se font en six points, (voir figures ci-dessous).

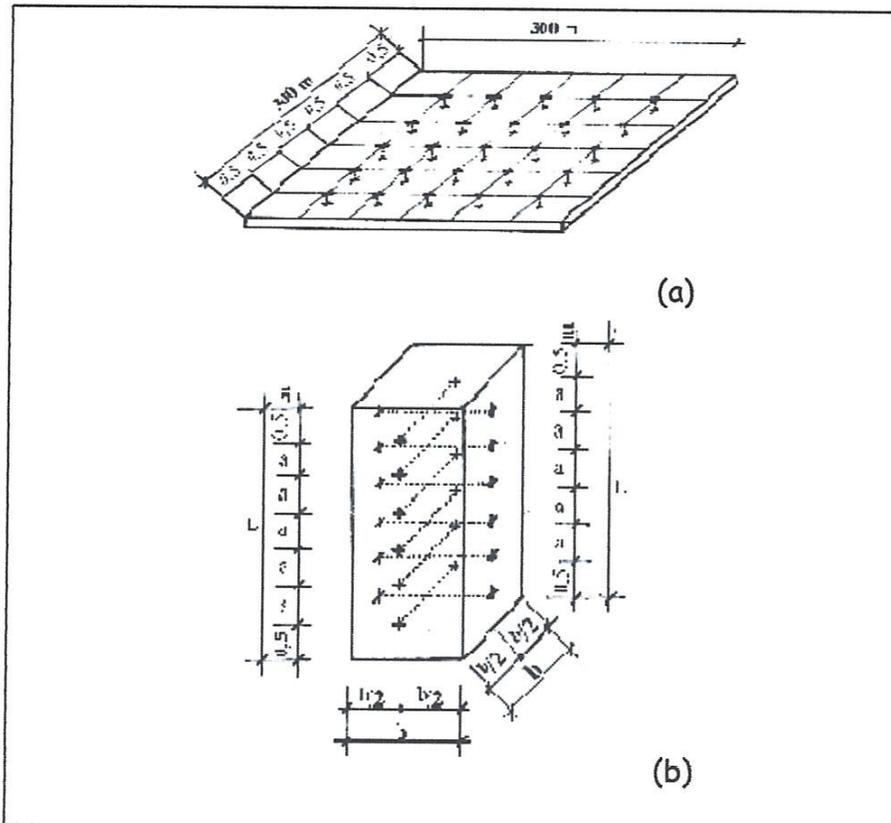


Figure III-17 Points de mesures

a : un panneau (exemple : une dalle de 3 x 3 m²)

b : un petit élément (exemple : en poteau de section b x b et de hauteur h)

III-11 INFLUENCE DES ARMATURES : [GREEN A.T, 1970]

La vitesse de propagation mesurée sur du béton armé, à proximité des armatures, est souvent plus élevée que celle que l'on mesure dans un béton de masse de même composition. En effet, la vitesse de propagation dans l'acier est de 1,2 à 1,9 fois celle que l'on mesure dans du béton non armé.

Dans certains cas, la première impulsion qui arrive au transducteur s'est propagée en partie dans l'acier et en partie dans le béton. L'accroissement apparent de la vitesse de propagation dépend de la proximité des armatures par rapport à l'emplacement des points de mesure, de la section et de nombre des armatures, de leur positionnement par rapport au parcours et de la vitesse de cette impulsion dans le béton d'enrobage.

III-11-1 FERS A BETON PLACE PERPENDICULAIREMENT A LA DIRECTION DE PROPAGATION DE L'ONDE

L'influence maximale due à la présence des armatures peut être calculée en supposant que pendant son parcours l'impulsion traverse la section totale de chacun des fers.

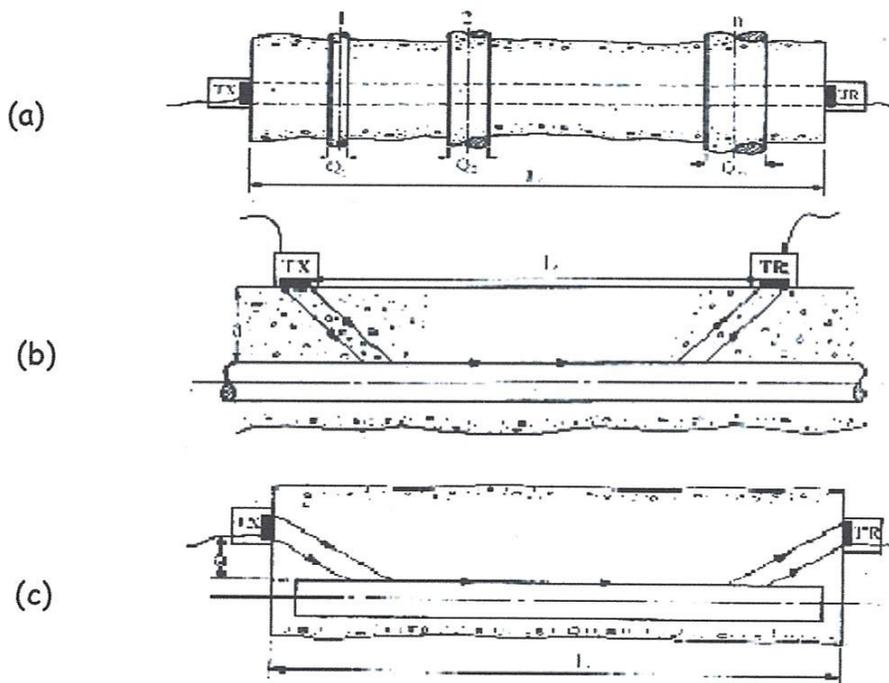


Figure III-18 Mesures dans le béton armé

- a : Armatures perpendiculaires à la direction de la propagation ;
- b : Armatures parallèles à la surface d'essai ;
- c : Armatures parallèles à la direction de la propagation

Chapitre III

Ls / L	$\frac{V_c}{V} = \frac{\text{Vitesse de propagation dans le béton}}{\text{Vitesse de propagation mesurée}}$		
	Béton de très mauvaise qualité Vc= 3000m/s	Béton de bonne qualité Vc=4000m/s	Béton de très bonne qualité Vc=5000m/s
1/12	0.96	0.97	0.99
1/8	0.94	0.96	0.98
1/6	0.92	0.94	0.97
1/4	0.88	0.92	0.96
1/3	0.83	0.89	0.94
1/2	0.75	0.83	0.92

Tableau III-1. Influence des armatures

L'axe de propagation étant perpendiculaire à l'axe des aciers

Il est probable que dans la pratique, V_c/V est un peu plus élevé que les valeurs données dans le tableau N°1, en raison du mauvais alignement possible des fers à béton et aussi parce que seul une petite partie de l'énergie d'impulsion traversera la section totale des armatures.

III-11-2 AXE DE L'ARMATURE PARALLELE A LA DIRECTION DE LA PROPAGATION

Si l'armature se trouve située à une distance « a » déterminée à partir de la ligne reliant les points d'application les plus rapprochés des deux transducteurs et que la longueur de parcours entre ces deux transducteurs est L, le temps de transmission T, dans l'un ou l'autre des cas de figures 5b ou 5c la valeur de la vitesse « V_s » peut être déterminée, en envoyant une impulsion le long de l'axe de l'armature enrobée par le béton.

Cette valeur est comprise entre 6000 m/s et 5200 m/s.

Les corrections à apporter à la vitesse de propagation mesurée dans la direction parallèle aux armatures sont données dans le tableau N°2.

Chapitre III

$\frac{a}{L}$	$\frac{\text{Vitesse de propagation dans le béton}}{\text{Vitesse de propagation mesurée dans le béton}} = \frac{V_c}{V_s}$			
	$\frac{V_c}{V_s} = 0.90$	$\frac{V_c}{V_s} = 0.80$	$\frac{V_c}{V_s} = 0.71$	$\frac{V_c}{V_s} = 0.60$
0	0.90	0.80	0.71	0.60
1/2	0.94	0.86	0.78	0.68
1/15	0.96	0.88	0.80	0.71
1/10	0.99	0.92	0.85	0.76
1/7	1.00	0.97	0.91	0.83
1/5	1.00	1.00	0.99	0.92
$\frac{1}{4}$	1.00	1.00	1.00	1.00

Tableau III-2 Influence des armatures
L'axe de propagation étant parallèle à l'axe des aciers

III-12 DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DU BETON : [SHIELD, 1997]

Pour pouvoir estimer la résistance à la compression du béton (R) à partir de la vitesse de propagation (V), il faut établir la corrélation graphique entre V et R par des essais sur éprouvettes.

La détermination de la corrélation existant entre la vitesse de propagation et la résistance à la compression, mesurée sur éprouvettes :

Pour établir la corrélation graphique entre V et R, il est nécessaire d'effectuer les mesures sur au moins 30 éprouvettes en procédant ainsi :

- Prendre une valeur moyenne de la vitesse de propagation et de la résistance à la compression sur une série de trois éprouvettes soumises à des conditions d'essai identique
- Faire varier la quantité d'eau de gâchage ou de la compacité pour les autres trois séries d'essai (le rapport E/C variant de 0.40 à 0.8 est généralement pris)

Il est bien entendu que toutes les autres caractéristiques du béton, à savoir : le type de ciment et le dosage, la nature des granulats, leur granulométrie et les proportions utilisées, les adjuvants, le mode de fabrication du béton, les conditions de cure et l'âge aux essais, doivent être identiques à celles du béton mis en œuvre in situ.

III-13 PARAMETRES INFLUANCANTS LA VITESSE DES ULTRASONS :

[JONES R, 1969]

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Le module d'élasticité des granulats varie énormément, de sorte que la vitesse des ondes dépend du module d'élasticité du granulat utilisé et de la quantité contenue dans le béton.

Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Il n'existe donc pas de relation unique entre la résistance à la compression et la vitesse des ondes sonores.

Cependant, pour un granulat et une composition donnés, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci, telles qu'un changement du rapport Eau/Ciment qui influe le module d'élasticité de la pâte. C'est seulement à l'intérieur de ces limites qu'on peut utiliser l'essai pour évaluer la résistance du béton.

De plus, d'autres facteurs influencent la propagation des ondes sonores : par exemple, les ondes se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent, les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes alors que la résistance in situ n'en n'est pas affectée.

Une armature de gros diamètre qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de sa vitesse, sans pour autant influencer la résistance à la compression du béton.

• *Influence du type de ciment*

Un premier facteur qui influe sur la corrélation vitesse -résistance est le type de ciment.

Le tableau suivant donne les résultats des essais à 28 jours d'âge.

Si nous prenons comme référence les bétons fabriqués avec des ciments usuels, les résistances mécaniques correspondant aux mêmes vitesses de propagation du son des autres bétons préparés avec d'autres ciments, s'évaluent à l'aide des coefficients d'influence ci-après :

Type de ciment	Coefficient d'influence
HRI	1.14
P 500 , BSS	1.07
CPA 400, CPAZ 400, M400, T25	1.00
F 300	0.85

Tableau III-3 Valeurs du coefficient d'influence du type de ciment

• Influence du dosage en ciment

Un autre paramètre important est le dosage en ciment.

Cependant la vitesse de propagation du son dans le béton est fortement influencée par la vitesse de propagation dans les gros agrégats qui constituent 50 à 60 % de tous les agrégats (il est plus long). Le tableau ci-dessous donne les coefficients d'influence en fonction des dosages en ciment

Dosage en ciment kg/m ³	Coefficient d'influence
100	0.46
150	0.61
200	0.75
250	0.88
300	1.00
350	1.11
400	1.21
450	1.30
500	1.38

Tableau III-4 Valeurs du coefficient d'influence du dosage en ciment

• Influence de la nature des agrégats

Comme rappelé ci-dessus, la vitesse du son dans le béton est fortement influencée par la vitesse dans l'agrégat qui constitue environ 80 % du béton.

De plus, la vitesse de propagation dans le béton est aussi fonction de la dimension des granulats. Ce phénomène s'explique par le fait que pour des agrégats provenant de la même roche, la vitesse de propagation du son dans les petits granulats est plus petite que dans les gros granulats.

Si on prend comme référence la résistance obtenue sur un béton avec des agrégats siliceux roulés, la résistance des autres bétons confectionnés avec des agrégats de nature différente sera obtenue en multipliant la résistance du béton de référence par les coefficients d'influence par nature d'agrégats donnés dans le tableau ci-après.

Nature des agrégats	Coefficient d'influence
Siliceux roulés	1.00
Andésite concassé	1.24
Granit concassé	1.09
Basalte concassé	0.91
Calcaire concassé	0.82

Tableau III-5 Valeurs du coefficient d'influence de la nature des agrégats

• Influence de la granulométrie

D'une façon générale, la granulométrie affecte la résistance du béton, c'est elle qui détermine les conditions de propagation de l'onde dans le béton, par conséquent elle a une grande influence sur la corrélation entre la vitesse du son et la résistance du béton.

Entre autre, plus l'agrégat est riche en fractions fines, plus la vitesse du son diminue, les coefficients d'influence sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Dimension maximale de l'agrégat en mm	Coefficient d'influence
70-80	0.94
30	1.00
15	1.05
7	1.12
3	1.25
1	1.71

Tableau III-6 Valeurs du coefficient d'influence de la granulométrie

Il est recommandé d'éviter les essais d'auscultation dynamique sur des éprouvettes dont les dimensions ne dépassent d'au moins 4 ou 5 fois la dimension maximale de l'agrégat employé.

• Influence de l'humidité du béton

L'humidité concernée est celle considérée comme facteur permanent durant toute la durée du durcissement du béton.

Si on adopte comme référence de l'humidité des éprouvettes celle qui correspond à un régime de conservation dit standard, les résistances mécaniques des bétons quel que soit leur mode de conservation s'évaluent par rapport au béton conservé dans les conditions standards et pour la même vitesse, à l'aide des coefficients d'influence donnés dans le tableau suivant :

Humidité du béton résultant	Coefficient d'influence
A l'air	1.04
Standard	1.00
• 1 jour dans le moule	
• 6 jours dans l'eau	
• 21 jours à l'air	

Tableau III-7 Valeurs du coefficient d'influence de l'humidité du béton

• Influence de la maturité du béton

Deux autres facteurs qui influent sur la corrélation entre la vitesse et la résistance sont l'âge et la température de conservation.

Si on adopte comme référence un béton conservé à la température de 25 °C pendant un intervalle de temps de 28 jours, la résistance d'un béton ayant la même composition mais un facteur de maturité différent sera, pour une même vitesse du son, calculée en utilisant les coefficients d'influence donnés dans le tableau 7.

Facteur de maturité en jours.	Coefficient d'influence
100	0.73
250	0.87
500	0.95
1000	1.00
3100	1.10
6300	1.18
13000	1.24
65000	1.36

Tableau III-7 Valeurs du coefficient d'influence de la maturité du béton

• Influence des adjuvants

Compte tenu de la diversité des adjuvants utilisés, leur influence sur la corrélation

vitesse-résistance est très complexe

Pour les deux additifs couramment utilisés à savoir l'accélérateur de prise et le plastifiant, les coefficients d'influence sont donnés dans le tableau ci-dessous ; le béton sans additif est pris comme référence.

Pourcentage d'additif		Coefficient d'influence
Accélérateur de prise	0	1.00
	2	1.19
	4	1.40
Plastifiant	0	1.00
	0.06	1.15
	0.12	1.30

Tableau III-8 Valeurs du coefficient d'influence des adjuvants
(approuver après une série de tests)

Quelques interprétations des Résultats de mesures aux ultrasons : [GIRY C et al, 2009]

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré comme homogène, isotrope et élastique et les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. Ces résistances ne sont utilisées par l'ingénieur que pour donner un avis qualitatif du béton in situ :

Selon le chercheur allemand *Wesche* on a :

2500 m/s \leq V < 3200 m/s béton de faible résistance,
3200 m/s \leq V < 3700 m/s béton de moyenne résistance,
3700 m/s \leq V < 4200 m/s béton à haute résistance,
V \geq 4200 m/s béton à très haute résistance.

D'autres appréciations peuvent être apportées telles que celles tirées des recommandations canadiennes données ci-dessous :

V < 2134 m/s très mauvaise qualité
2134 m/s \leq V < 3048 m/s mauvaise qualité
3048 m/s \leq V < 3658 m/s douteuse
3658 m/s \leq V < 4572 m/s bonne
V \geq 4572 m/s excellente

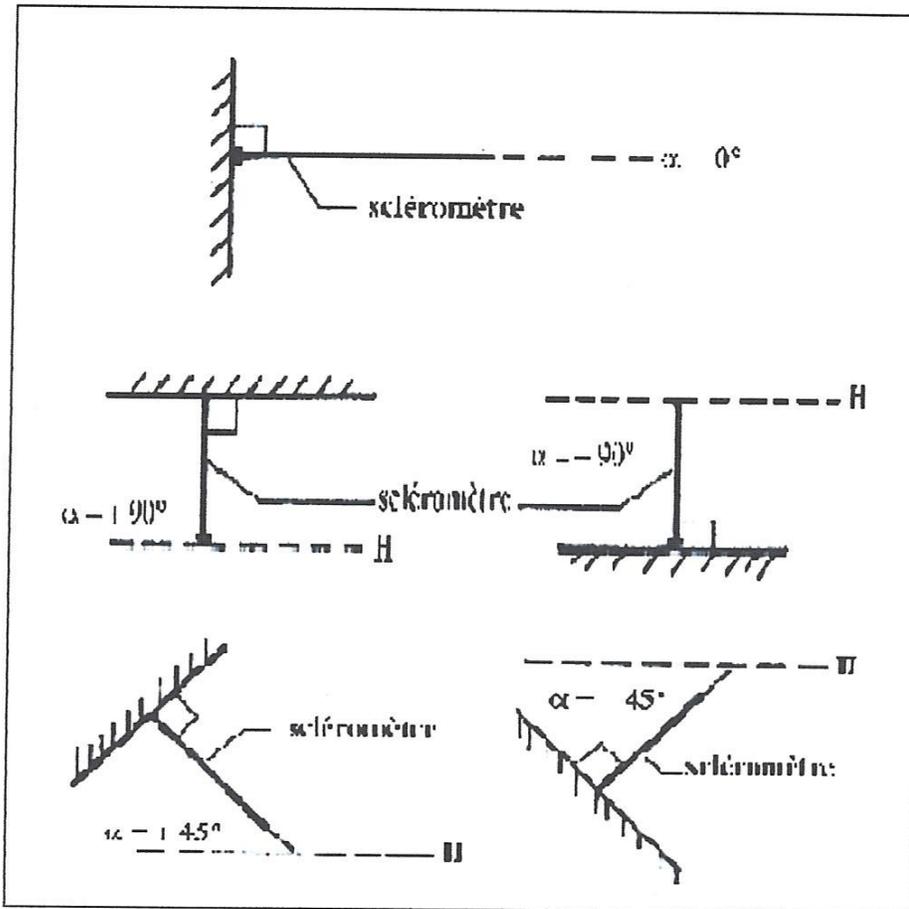


Figure III-18 Élément à tester par le scléromètre

Indice de rebondissement	Correction de la valeur de l'indice de rebondissement pour les différents angles d'inclinaison de l'appareil			
	Essais vers le haut		Essais vers le bas	
	+90°	+45°	-90°	-45°
20	Non valable	Non valable	+2,4	+3,2
>20	-5,4	-3,5	+2,4	+3,4
>30	-4,7	-3,3	+2,3	+3,1
>40	-3,9	-2,0	+2,0	+2,7
>50	-3,1	-2,1	+1,6	+2,2

Tableau III-10 Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d'inclinaison

III-16 APPAREILLAGE : [SCHMIDT, 1951]

III-16-1 SCLEROMETRE

Le modèle le plus utilisé pour la détermination non-destructive de la résistance du béton sur la base du recul est le scléromètre SCHMIDT (Suisse).

Il existe plusieurs modèles de scléromètres SCHMIDT selon le type de recul ainsi que l'énergie d'impact (tableau III-11).

Type de recul	Modèle	Energie d'impact (Kgf.m*)	Domaine d'utilisation
Linéaire	L	0.075	- Eléments minces en béton. - Bétons à base d'agréats légers.
	M	3.000	Eléments massifs.
	N	0.225	Bétons usuels.
	NA	0.225	Contrôle de la qualité du béton sous l'eau.
	NR	0.225	Identique au modèle N mais avec un dispositif d'enregistrement des mesures.
	LB	0.075	Contrôle de la qualité des produits en terre cuite (particulièrement des tuiles).
Angulaire	P	0.090	- Eléments ayant des dimensions transversales réduites. - Bétons et enduits de moindre résistance.
	PT	0.090	Contrôle de la qualité des matériaux de très faible résistance ($R_c = 5 \text{ à } 80 \text{ kgf.m/cm}^2$).

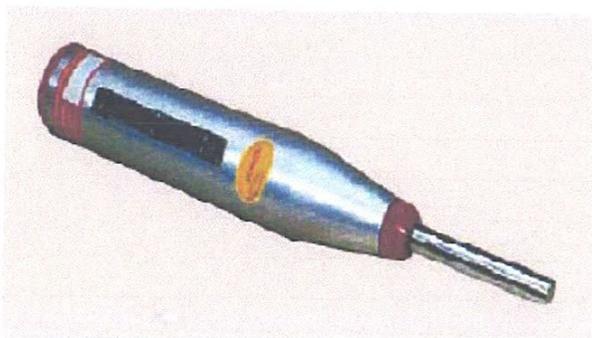
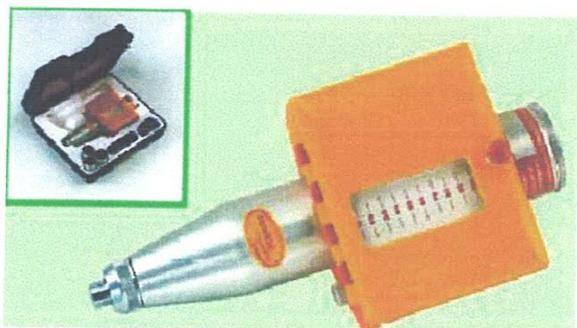
(*) 1 kgf.m = 9.81 J

Tableau III-11 Modèles des scléromètres existants

L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion.

SCLEROMETRE SCHMIDT





III-16-2 PIERRE A POLIR

La pierre à polir est une pierre abrasive de texture à grains moyens. Cette dernière est utilisée pour la préparation des surfaces de mesure.

III-16-3 BLOC D'ETALONNAGE

Le bloc d'étalonnage, en néoprène armé, est de dimensions 25cm x 25cm x 6cm.

III-16-4 ETALONNAGE DE L'APPAREIL

Le scléromètre doit être contrôlé par des essais d'étalonnage, car les constantes des ressorts changent après plusieurs utilisations.

Deux méthodes sont utilisées pour l'étalonnage du scléromètre :

Sur bloc en néoprène armé

Cette méthode consiste à effectuer sur le bloc en néoprène, posé sur une assise rigide et plane, deux séries de 27 mesures espacées de 5 s et à calculer la moyenne de l'indice sclérométrique I_{sm} de la 2ème série. La position de l'appareil doit être verticale.

Dans le cas où :

$28 \leq I_{sm} \leq 32$: le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant

$I_{sm} < 28$ ou $I_{sm} > 32$: appareil défectueux

Dans le deuxième cas, il est procédé au nettoyage de l'appareil afin de déterminer une nouvelle fois la valeur de I_{sm} .

Si l'appareil est toujours défectueux, donc il est inutilisable. Une révision est nécessaire dans ce cas avec un certificat d'étalonnage.

Sur éprouvettes de béton

Cette méthode consiste à déterminer la moyenne de l'indice sclérométrique I_{sm} par des mesures effectuées sur trois séries de trois éprouvettes de béton, correspondant aux trois résistances à la compression 15, 25 et 35 MPa.

La moyenne de l'indice I_s est déterminée pour chaque niveau de résistance.

Les mesures de l'indice I_s sont suivies d'un essai d'écrasement des éprouvettes.

Les trois couples de valeurs sont reportés sur le graphique de la figure III-19.

Dans le cas où les trois points représentatifs se retrouvent à l'intérieur du fuseau, donc le fonctionnement de l'appareil est satisfaisant. Dans le cas contraire, le fonctionnement de l'appareil est défectueux.

Une révision est nécessaire avec un certificat d'étalonnage.

GRAPHIQUE DE RÉFÉRENCE

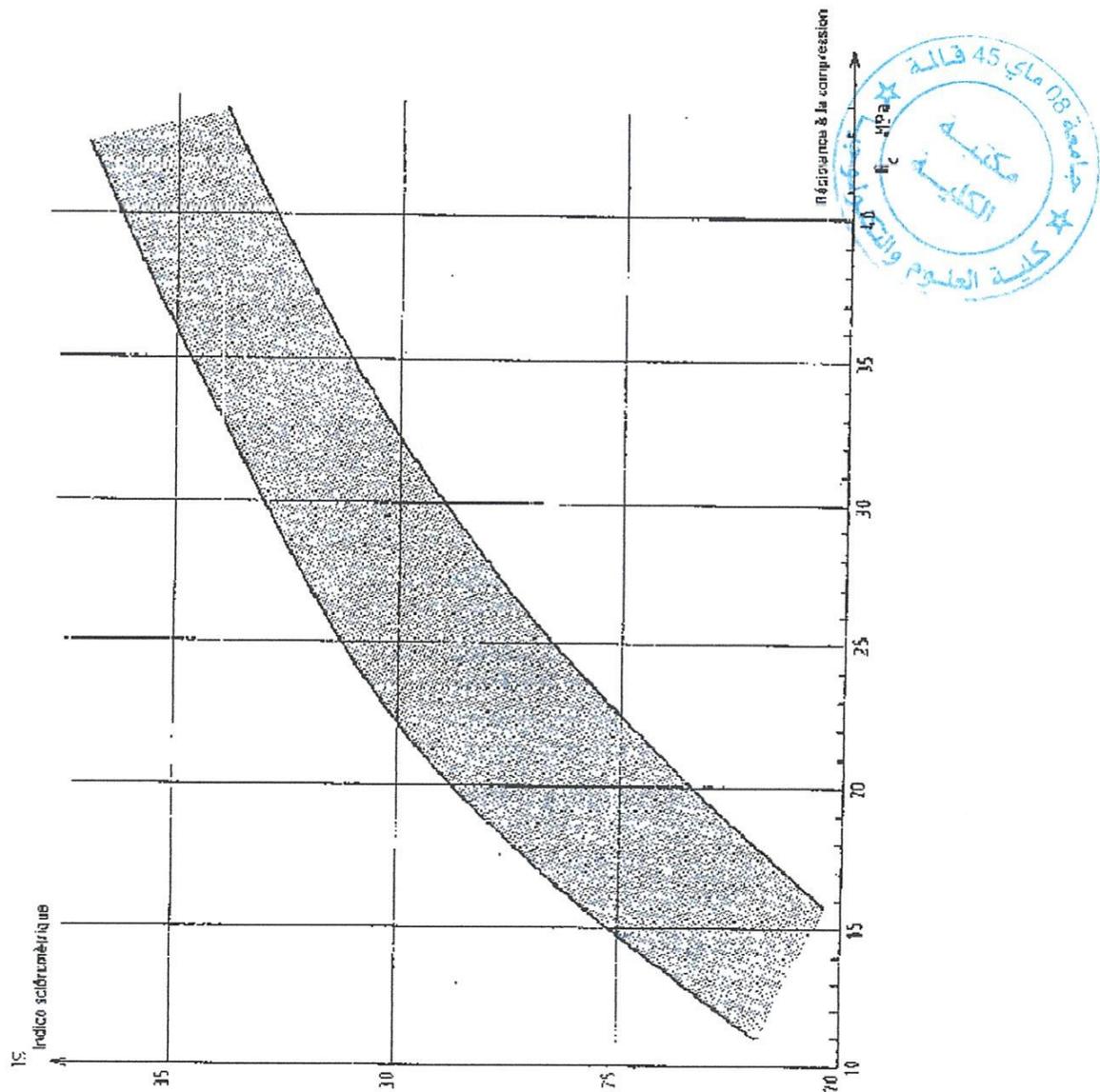


Figure III-19 Graphe de contrôle du fonctionnement de l'appareil sur éprouvettes

III-16-5 MODE OPERATOIRE : [GRIEB, 1956]

III-5-1 MESURES SUR OUVRAGE :

a. PREPARATION DE LA SURFACE :

Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas des nids de gravier, des écaillages, une texture grossière, une porosité élevée ou des armatures affleurantes.

La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérent ou poncer si cette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau sur la surface doit être essuyée.

b. RELEVÉ DES MESURES

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm² au moins.

Chaque zone est structurée en un grillage de points de mesure ayant pour espacement $d = 30 \div 50$ mm.

Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée.

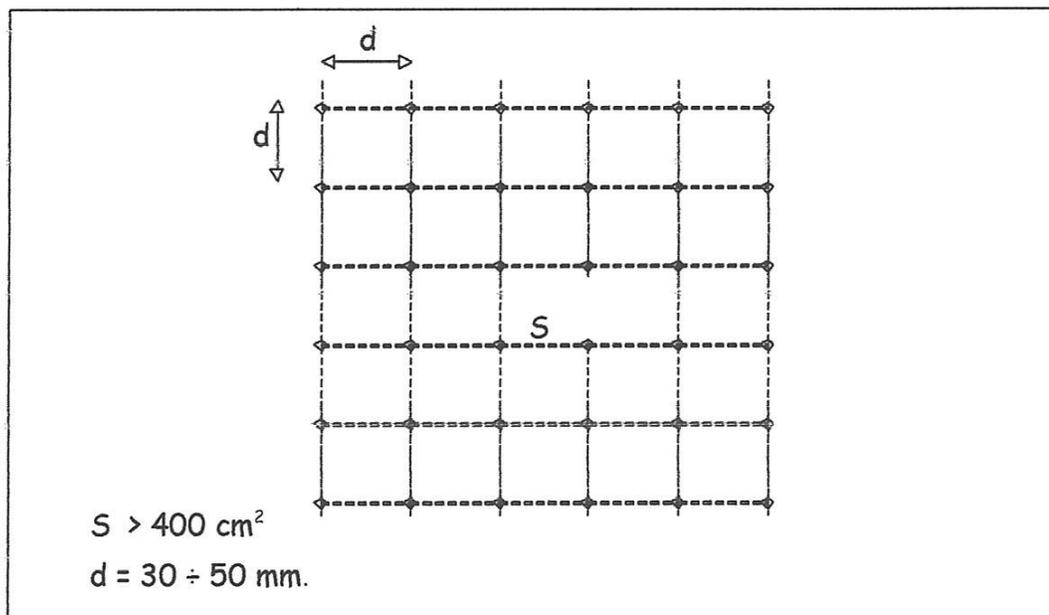


Figure III-20 Grille de mesure sur ouvrage

III-16-5-2 MESURES SUR EPROUVETTES :

Il est procédé au relevé de 27 mesures sur éprouvettes cylindriques 16 x 32 avec le respect des distances montrées sur la figure.

Les éprouvettes doivent être maintenues entre les plateaux de la presse sous une contrainte de 0.5 MPa.

Les mesures au scléromètre ne peuvent être effectuées qu'après 48h de la sortie des éprouvettes de leur ambiance de conservation.

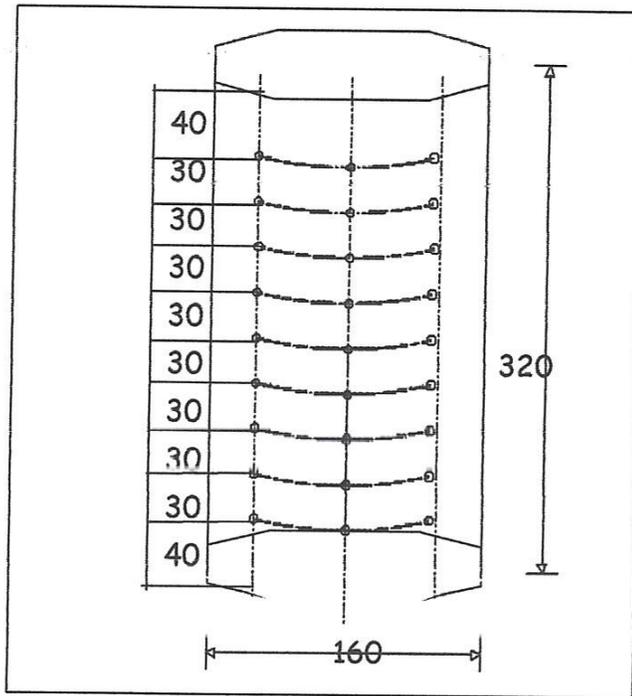


Figure III-21 Grille de mesure sur éprouvette

L'essai s'effectue avec l'appareil placé en position horizontale et une surface lisse.

Amener la tige au contact du béton et presser l'appareil dans le sens de l'effort exercé.

Mesurer le rebondissement de la masselotte en observant la nouvelle position prise par l'index devant l'échelle graduée.

Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone. La surface de cette zone est équivalente à celle d'un carré d'environ 25 cm de côté. Au cours de ces mesures, il convient de ne pas effectuer l'essai à moins de 3 à 4 cm des bords de l'élément testé.

III-16-6 INCONVENIENTS DE LA METHODE SCLEROMETRIQUE :

La méthode sclérométrique constitue une voie directe utilisée pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de la surface de l'élément en béton.

Bien que l'essai au scléromètre est utile, il ne constitue nullement une mesure de la résistance du béton vu les paramètres influençant la précision de détermination de cette résistance.

III-17 CONTROLE PAR LE SCLEROMETRE : [POLDER, 2001]

Il existe plusieurs méthodes pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton.

III-17-1 METHODE DE LA COURBE UNIQUE :

Dans la plupart des cas, la composition du béton ainsi que les conditions de conservation influençant la corrélation « Indice sclérométrique - Résistance du béton » sont inconnues.

On utilise alors une courbe de transformation unique figurant sur l'appareil.

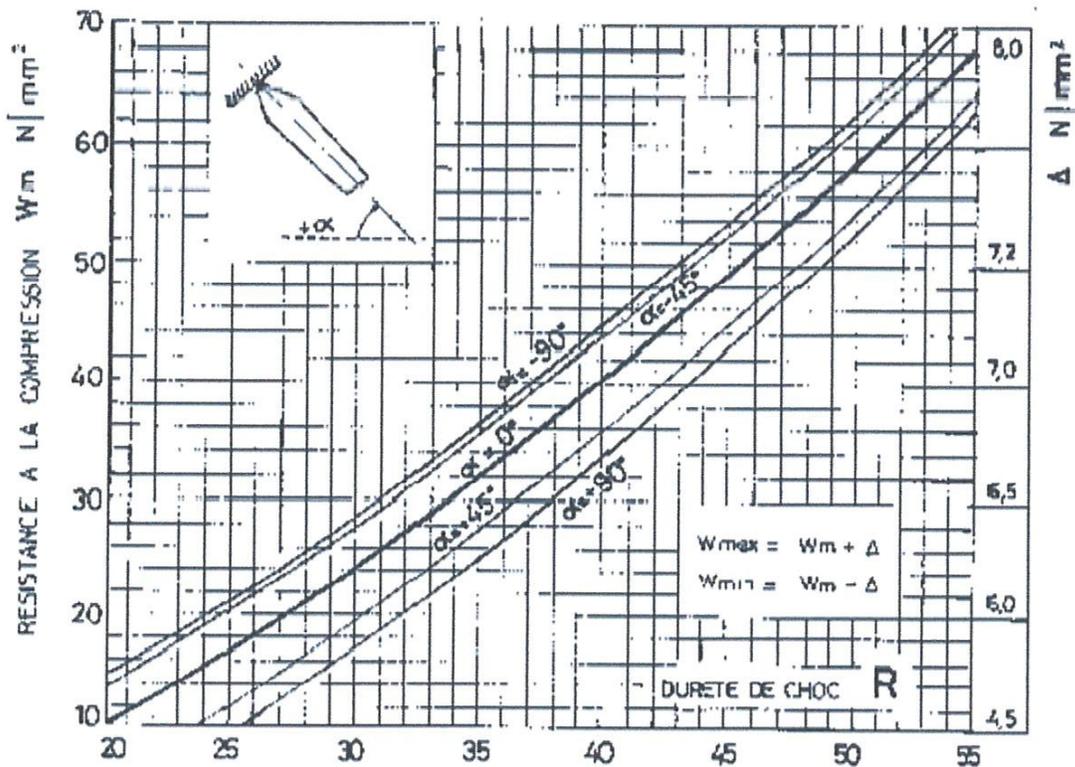


Figure III-22 Résistance à la compression sur cube en fonction de la dureté au choc.

La courbe unique de corrélation du scléromètre type N ne peut être utilisée dans les cas suivants :

- Agrégats artificiels
- Agrégats légers, concassés ou de faible dureté
- Gravillons polis
- Agrégats non lavés riches en argile adhérente
- Béton ayant un très faible dosage en ciment ou mélange très sec ou insuffisamment serré
- Bétons frais

- Bétons sous l'eau
- Bétons très vieux et secs
- Bétons de faible résistance < 20 MPa.

III-17-2 METHODE DE LA COURBE DE CALIBRAGE :

Cette méthode est utilisée dans les usines de préfabrication où les matières premières sont relativement constantes.

La courbe de calibrage est déterminée en effectuant l'essai au scléromètre sur au minimum 30 éprouvettes. L'arrête de l'éprouvette ne devrait pas être inférieure à 15 cm.

Les éprouvettes doivent être soumises au même régime de durcissement que celui des éléments préfabriqués.

Dans le cas où les mesures scléro métriques sont effectuées sur la face de coulage du béton de l'élément préfabriqué, il est recommandé de faire pareil pour les éprouvettes.

Après les essais au scléromètre, les éprouvettes sont soumises à un essai de compression lent dont la durée est plus d'une minute.

Les résultats obtenus sont portés sur un graphique représentant la courbe d'étalonnage dont le tracé concorde mieux avec les résultats expérimentaux en appliquant la méthode des moindres carrés.

La courbe de calibrage doit être revue en cas de changement de la composition du béton ou des conditions de conservation.

La précision sur la résistance du béton obtenue par la méthode de la courbe de calibrage est évaluée à $\pm (20\% \div 25\%)$.

III-17-3 METHODE DES COEFFICIENTS D'INFLUENCE NON CORRIGES :

Dans le cas de la non-disponibilité des éprouvettes pour la détermination de la courbe de calibrage, et l'existence des données sur la composition du béton à tester, on considère que ces informations sont suffisantes pour déduire une courbe de valeurs corrigées.

Les valeurs corrigées n'offrent pas la même précision que la courbe de calibrage mais sont préférables aux valeurs données par la courbe unique illustrée sur l'appareil.

Pour cette méthode, on admet comme béton de référence un béton ayant la composition suivante :

- Ciment type CPA400 dosé à 300 kg/m³
- Agrégats roulés siliceux

- Indice de maturité 1000
- Humidité résultant d'une conservation durant 1 jour dans le moule, 6 jours dans l'eau et 21 jours à l'air, à 40-60% d'hygrométrie relative.

Pour ce béton la corrélation indice sclérométrique - résistance à la compression est égale à :

$$R_c = 0.09n^{2.27} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad \dots (6)$$

La courbe d'étalonnage définie par la relation ci-dessus est reproduite pour un coefficient de transformation $C_t = 1.0$ (coefficient C_t pour béton sec).

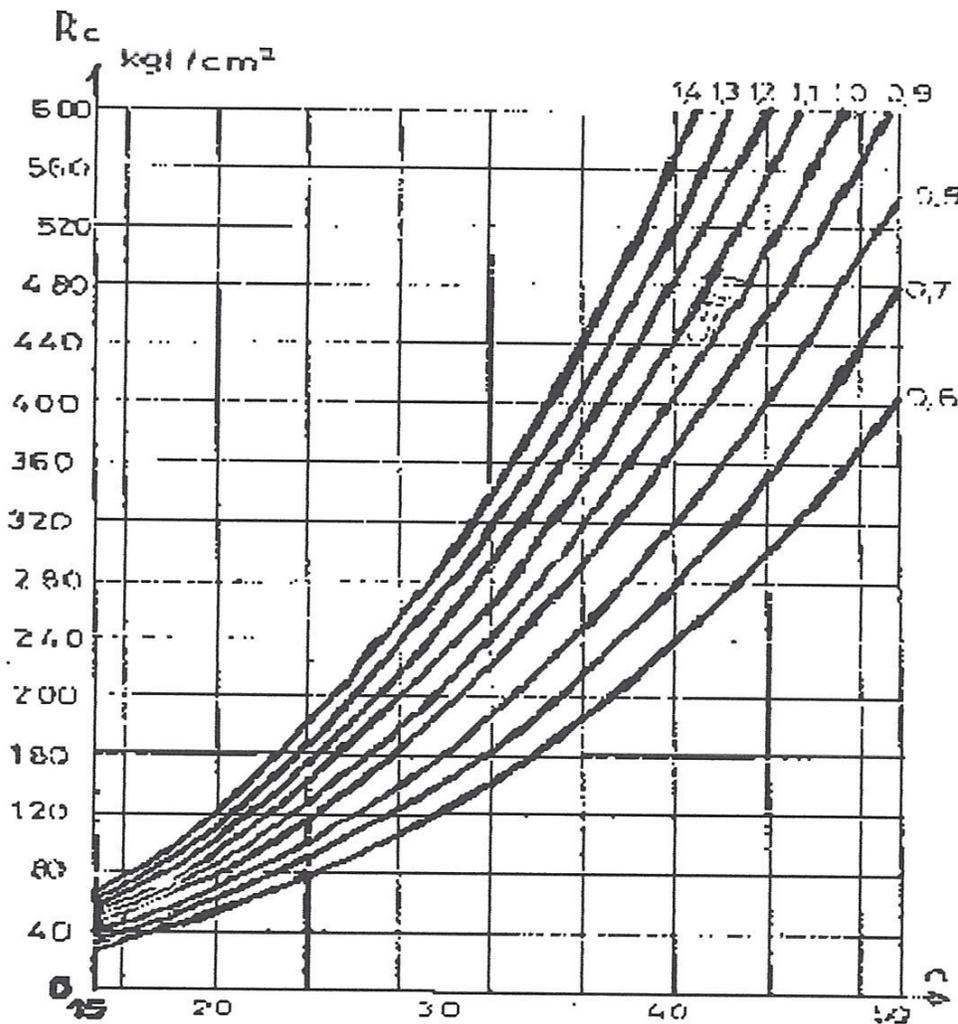


Figure III-23 Courbes d'étalonnage pour bétons conservés à l'air

Si les bétons à tester diffèrent du béton de référence, la correction est faite à l'aide du coefficient total d'influence C_t pris égal à :

$$C_t = C_c . C_d . C_a . C_m . C_u \dots (7)$$

Avec :

C_c : coefficient d'influence du type de ciment

C_d : coefficient d'influence du dosage en ciment

C_a : coefficient d'influence du type de granulas

C_m : coefficient d'influence de la maturité du béton

C_u : coefficient d'influence de l'humidité du béton

a. Coefficient d'influence du type de ciment C_c

Le coefficient d'influence du type du ciment C_c est le rapport entre la résistance des bétons préparés avec des ciments CPA et HRI et celle des bétons à base du ciment CLK250.

Type de ciment	C_c
CPA, HRI, ... etc	1.00
CLK250	0.90

Tableau III-12 Valeurs du coefficient C_c .

b. Coefficient d'influence du dosage en ciment C_d

Le rapport des résistances des bétons à différents dosages pour le même indice sclérométrique représente le coefficient d'influence du dosage.

Dosage (kg/m^3)	C_d
100	0.67
200	0.85
300	1.00
400	1.12
500	1.24

Tableau III-13 Valeurs du coefficient C_d .

c. Coefficient d'influence du type de granulas C_a

Le coefficient d'influence du type de granulas est pris égal à $C_a = 1.00$ pour les bétons avec des agrégats siliceux roulés, pour les autres types, ce coefficient doit être déterminé par des essais.

d. Coefficient d'influence de la maturité du béton C_m

Lorsque la maturité du béton augmente la dureté et la résistance de la couche de surface devient plus grande ce qui diminue la valeur de l'indice sclérométrique.

Il n'est pas recommandé d'utiliser le scléromètre sur des bétons ayant un facteur de maturité supérieur à 40 000 (4 ans).

Maturité du béton $C \times \text{jours}$	C_m
300	1.06
1000	1.00
6000	0.92
36000	0.80

Tableau III-14 Valeurs du coefficient C_m .

e. Coefficient d'influence de l'humidité du béton

Si l'on prend comme référence la résistance du béton résultant d'une conservation durant 1 jour dans le moule, 6 jours dans l'eau et 21 jours à l'air, à 40-60% d'hygrométrie relative, alors la résistance du béton pour d'autres degrés d'humidité ainsi que pour d'autres indices scléro-métriques peut être évaluée à l'aide du coefficient C_u .

Humidité	C_u	
	n = 20	n = 40
Saturé (sous l'eau)	1.52	1.12
Standard	1.00	1.00
A l'air sec	0.94	0.96

Tableau III-15 Valeurs du coefficient C_u .

Pour les bétons humides (saturés d'eau), un coefficient noté C_t' sera utilisé pour la détermination de la valeur de la résistance du béton testé. $C_t' = C_c \cdot C_d \cdot C_a \cdot C_m$

Calcul de la résistance du béton

$$\text{Dans le cas d'un béton sec : } R_{ef} = R_{st} \cdot C_t \quad \dots(8)$$

$$\text{Dans le cas d'un béton humide : } R_{ef} = R_{st}' \cdot C_t' \quad \dots(9)$$

R_{st} , R_{st}' : résistances du béton de référence standard.

C_t , C_t' : coefficients d'influence totaux.

La méthode des coefficients d'influence non corrigés donne une précision variant entre $\pm 30\%$ et $\pm 40\%$. Cet écart est dû au manque de relation sûre entre la qualité du béton en surface et dans la masse empêchant ainsi d'obtenir une plus grande précision.

Chapitre IV
TECHNIQUES DE REPARATION ET DE
RENFORCEMENT

IV-1 INTRODUCTION :

Le choix d'une ou des méthodes de réparation et de renforcement est défini en relation étroite avec la nature et le degré d'importance des désordres constatés lors d'un diagnostic.

Ce choix est tributaire de matériaux de construction utilisés, des techniques choisies, et de critères économiques.

On peut être amené donc à procéder :

- ☐☐ A des *remises en état* d'éléments structurels présentant des défauts que l'on cherche à atténuer, pour obtenir un aspect satisfaisant tels que : l'obturation de fissures qui sont dues, le plus souvent, au retrait et aux variations environnementales.
- ☐☐ Au *renforcement* ou à la *réparation* d'éléments insuffisamment résistants, les réparations sont souvent réalisées dans les zones où les sections sont trop sollicitées et défailtantes, par contre le renforcement des éléments consiste à améliorer leurs caractéristiques mécanique de manière à ce qu'elles offrent une meilleure solidité aussi bien en état de service qu'en état de résistance ultime.

IV-2 CARACTERISTIQUES DES PRODUITS DE RENFORCEMENT :

Les produits de renforcement utilisés doivent posséder, vis-à-vis d'un béton dégradé, les qualités suivantes :

a) Présenter une *compatibilité* avec le support béton à savoir :

- ☐☐ Un retrait limité pour des liants hydrauliques employés, ce phénomène qui apparaît dès la prise et au durcissement final, et de manière à éviter l'apparition de fissures ou un décollement de l'interface
- ☐☐ Une adhérence au béton support et une résistance au moins égale à la résistance du béton renforcé.
- ☐☐ Une adhérence aux armatures métalliques initiales ou rajoutées.
- ☐☐ Des résistances mécaniques à la compression, à la traction, similaire ou supérieures à celles du béton de support.
- ☐☐ Un coefficient de dilatation le plus proche possible de celui du béton support.

b) Présenter une *durabilité* par rapport aux conditions environnementales :

- ☐☐ Les principaux agents agressifs participant au phénomène de corrosion des armatures à prendre en compte pour l'environnement sont : les chlorures, les sulfates, le gaz carbonique, l'oxygène
- ☐☐ Comme tout béton réalisé selon les règles de l'art, les produits de renforcement doivent présenter une bonne tenue vis-à-vis des agents agressifs :

- La résistance à la carbonatation, c'est-à-dire à la pénétration du gaz carbonique contenu dans l'air qui, lorsqu'il entrera en contact avec les armatures, provoquera leur corrosion. Cette caractéristique est étroitement liée, outre à l'aspect formulation du produit de renforcement, à la qualité de sa mise en œuvre, et à la mise en place.
- La résistance aux sulfates apportés soit par l'eau de mer, soit par l'eau présente dans des sols riches en gypse, ou par le sel de déverglaçage utilisé en hiver, dans un milieu alcalin comme le béton, la présence de sulfates provoque la formation d'hydrates expansifs (ettringite) entraînant, à terme, la ruine du béton il faut tenir compte de cet élément pour la formulation du produit de renforcement fabriqué en usine ou sur chantier, en choisissant les ciments adaptés.
- La résistance aux chlorures apportés essentiellement par l'eau de mer, et le sel de déverglaçage, les chlorures migrant dans le béton se transforment en acide chlorhydrique provoquant la corrosion des armatures.
- La résistance aux cycles de gel et dégel, est indispensable, ainsi pour de tels produits de renforcement à base de liant hydraulique, une exigence d'un entraîneur d'air s'avère nécessaire.

IV-3 DIFFERENTS TYPES DE REPARATION OU RENFORCEMENT :

IV-3-1 ADJONCTION D'ARMATURES D'ACIERS :

IV-3-1-1 INTRODUCTION :

Il s'agit là, d'enlever le béton dans les zones où les aciers sont corrodés.

Les armatures existantes, conservées doivent être bien soignées, afin éviter une continuité de leurs dégradations.

Les armatures complémentaires doivent s'opposer à la fissuration et contribuer à la résistance des sections ainsi renforcées.

La liaison s'effectue par scellement tout en respectant les longueurs de recouvrement et d'ancrage.

La géométrie d'origine doit être régénérée avec des mortiers riches pour augmenter l'adhérence et la résistance mécanique de sections finales.

IV-3-1-2 MISE ENPLACE DES ARMATURES COMPLEMENTAIRES :

A cette étape des travaux, un contrôle du diamètre résiduel des armatures les plus fortement attaquées sera effectué (à l'aide d'un pied à coulisse par exemple).

Les armatures supplémentaires de même nature seront mises en place, par scellement, ou des systèmes explicites de fixation (cheville, tiges collées), afin de restituer la section initiale, avec une tolérance de 5%, en tenant compte des longueurs d'ancrage et de recouvrement, et des armatures de couture. Dans le cas de soudure, celle-ci devra être effectuée, selon les normes en vigueur, après que la soudabilité de l'acier ait été vérifiée.

IV-3-1-3 PROTECTION DES ARMATURES :

La protection des armatures consiste à appliquer sur toute la surface de celles qui sont dégagées : un produit assurant une protection vis-à-vis de la corrosion. Ce traitement n'est réellement nécessaire que si, pour des raisons techniques, l'enrobage final ne peut pas avoir la valeur prévue dans les règlements, pour un environnement donné. Il est également fonction de la nature du produit de reconstitution du parement.

On devra également s'assurer de la compatibilité avec les traitements ultérieurs (électriques notamment). Cette application doit suivre immédiatement le décapage, car l'oxydation des armatures risque de s'amorcer et de compromettre la bonne tenue de la réparation.

IV-3-1-4 REFECTION DES BETONS :

La réfection des bétons consiste à rétablir l'enrobage des armatures par la mise en œuvre d'un mortier riche. Ce dernier doit respecter les critères :

- De la tenue d'aplomb de l'élément.
- D'une résistance mécanique supérieure ou égale au béton support.
- D'adhérence supérieure ou égale à la cohésion du support,
- D'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs,
- D'un coefficient de dilatation thermique équivalent au béton support.
- D'une bonne protection d'aciers.

Ces critères sont assurés par l'utilisation de mortiers à base de résine pour améliorer les propriétés de l'apport, surtout lorsqu'il réagit dans la partie de l'interface où il y a plusieurs phénomènes tels que : l'influence du retrait en terme de glissement sur l'interface du béton initial et le béton nouveau.

Ce type de réparation demande généralement, pour être efficace, une augmentation assez importante des dimensions des éléments de structure et l'emploi d'un volume relativement consistant de matériaux, ce qui n'est pas plaisant ni sous l'aspect économique, ni sous l'aspect esthétique (Figure IV-1).



Figure IV-1 Réfection des bétons et protection des armatures.

IV-3-2 PROJECTION DU BETON :

IV-3-2-1 INTRODUCTION :

Cette technique est largement répandue, tant sur le plan de renforcement des structures ou éléments structurels insuffisantes, que sur un plan de réparation des structures ou éléments structurels défailantes, et exigeant une mise en œuvre soignée. Le béton projeté peut éventuellement être associé avec un autre mode de réparation, qui est le rajout d'armatures d'aciers. Cette méthode de projection de béton peut être réalisée, soit par voie sèche ou bien par voie humide.

Le procédé par voie sèche est particulièrement recommandé pour la réparation des ouvrages car cette voie permet de recueillir un béton très compact.

Cette projection est effectuée à grande vitesse de lancement, assurant ainsi :

- Une pénétration en grande profondeur dans les pores du support à renforcer.
- Une bonne adhérence de l'interface.

Si les dégradations sont profondes, on procède au préalable à un repiquage ou une démolition des surfaces de béton, sinon on fait appel au procédé de sablage pour le cas des dégradations superficielles.

La qualité des matériaux d'adjonction ou de rajouts, doit être au moins égale à celles des matériaux d'origine des ouvrages.

Dans la mesure du possible, la lance de projection doit être tenue perpendiculairement à la surface à traiter, et à une distance moyenne de 1.2m.

En faisant un nombre de passes aussi faible que possible, il faut chercher à réaliser un enrobage régulier, et obtenir ainsi une couche compacte.

La projection verticale vers le bas n'est pas recommandée, ainsi qu'un talochage n'est pas souhaité.



Figure IV-2 Renforcement au moyen de béton projeté

IV-3-2-2 DESCRIPTION DES DEUX METHODES :

IV-3-2-2-1 PROJECTION PAR VOIE SECHE :

La vitesse des éléments du mélange à la sortie de la lance est de l'ordre de 100m/s. elle décroît plus rapidement pour les éléments de faible masse (eau-fines -ciment) que pour les gros granulats. Il se forme alors sur la surface d'application une fine couche de pâte formée par l'eau et le ciment, qui retient instantanément les granulats fins, mais sur laquelle les gros granulats commencent par rebondir, au fur et à mesure de son épaisseur, cette couche est « martelée » par les gros granulats qu'elle finit par retenir, ce qui donne :

- ☐☐ Un serrage énergétique dû à la grande vitesse de projection.
- ☐☐ Une bonne adhérence due à la richesse en ciment dans la zone au contact de la surface d'application.

Du fait de l'enrichissement en ciment au voisinage de la surface, le dosage initial en ciment peut être limité. Toutefois les normes préconisent un dosage pas moins de 280 kg/m³ de ciment ayant une résistance à la compression supérieure à 25 MPa.

IV-3-2-2-2 PROJECTION PAR VOIE MOUILLEE :

La vitesse de transport et de projection est inférieure à 1m/s, nettement plus faible que dans le cas d'une projection à voie sèche. Le mélange ayant sa composition définitive au passage de la lance, il n'y a pas de surdosage dans la zone de contact avec la surface d'application.

Pour obtenir des performances mécaniques équivalentes à celles d'un béton projeté par voie sèche, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment.

L'emploi d'adjuvants permet d'obtenir la maniabilité désirée, avec un dosage en eau aussi faible que possible, une telle consistance du béton exigera un affaissement au cône correspondant, de l'ordre de 12 cm.

IV-3-2-3 AVANTAGES DES DEUX METHODES :

a) Par voie sèche :

- possibilité d'utiliser des granulats de grande dimension (15 à 20 mm)
- Un dosage relativement faible en ciment.
- Un faible rapport E/C.
- Un compactage énergique
- Une bonne adhérence sur le support.
- Une pénétration en grande profondeur dans les pores.
- Une éventuelle projection en plafond sans accélérateur de prise

b) Par voie mouillée :

- Composition uniforme de la couche projetée
- Pas de rebondissement violent.
- Pas de production de poussières.

IV-3-2-4 INCONVENIENTS DES DEUX METHODES :

a) Par voie sèche :

- Pertes de volume du béton projeté importantes par rebondissement.
- Production de poussières.

b) Par voie mouillée :

- Dosage en eau et en ciment plus élevé pour assurer une plasticité nécessaire.
- Compactage faible.
- Nécessité d'accélérateurs de prise.

IV-3-3 CHEMISAGE DES SECTIONS DE BETON :

IV-3-3-1 INTRODUCTION :

Le procédé classique dont l'efficacité a été largement vérifié par l'expérience, consiste à chemiser l'élément en augmentant sa section par mise en œuvre d'une grande épaisseur de béton sur tout le périmètre de l'élément primitif. L'utilisation d'un micro-béton, auto-compactable, pour remplir les interstices sans mode de vibration, peut s'avérer essentielle.

La préparation du support est très importante, il est donc nécessaire de faire des décaissés dans le béton pour améliorer la transmission des efforts, de traiter les surfaces avec une peinture primaire de résine époxy.

S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage.

Lorsqu'il n'est pas possible de faire un chemisage complet des éléments pour le cas des façades, il faut recourir à d'autres procédés : renforcement par plaques métalliques ou bien l'épaississement de l'élément en béton sur deux faces opposées

Les éléments de renfort doivent être ancrés dans le béton primitif : soit par boulonnage pour le cas des platines métalliques, soit par ancrage pour le cas de béton additif.

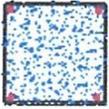
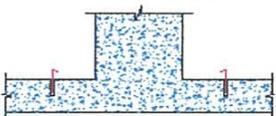
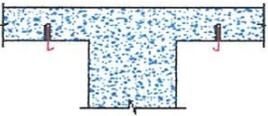
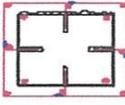
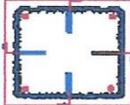
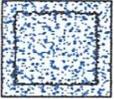
 <p>1-Nettoyage et sablage du support initial de béton du poteau</p>	 <p>2-Ancrage et scellement de chevilles pour fixation d'armatures additionnelles.</p>	 <p>3-scellement d'armatures d'ancrage sur le plancher en amont du poteau</p>
 <p>4- scellement d'armatures d'ancrage sous le plancher en aval du poteau.</p>	 <p>5-fixation des armatures additionnelles sur les tiges d'ancrage.</p>	 <p>6-étalage d'une couche de résine sur la surface de béton primitif.</p>
 <p>7-coulage de l'enveloppe en béton riche et fluide.</p>		

Figure IV-3 Différents étapes de renforcement des poteaux au moyen d'une enveloppe en béton armé (chemisage).

IV-3-3-2 ADHERENCE ENTRE LES DEUX BETONS :

L'adhérence représente la résistance au cisaillement, en l'absence d'un effort de compression normal sur cette interface et d'une armature de couture qui la traverserait.

Cette adhérence est due essentiellement à une liaison chimique entre le béton existant et le nouveau béton. La valeur maximale de l'adhérence est atteinte pour des valeurs de glissement d'environ 0,01 à 0,02 mm et est maintenue pratiquement constante jusqu'à des valeurs de glissement de l'ordre de 0,05mm.

IV-3-3-3 LES INCONVENIENTS DE CHEMISAGE :

Les inconvénients de renforcement par un béton additionnel sont résumés comme suit :

Chemisage en béton = augmentation de la section

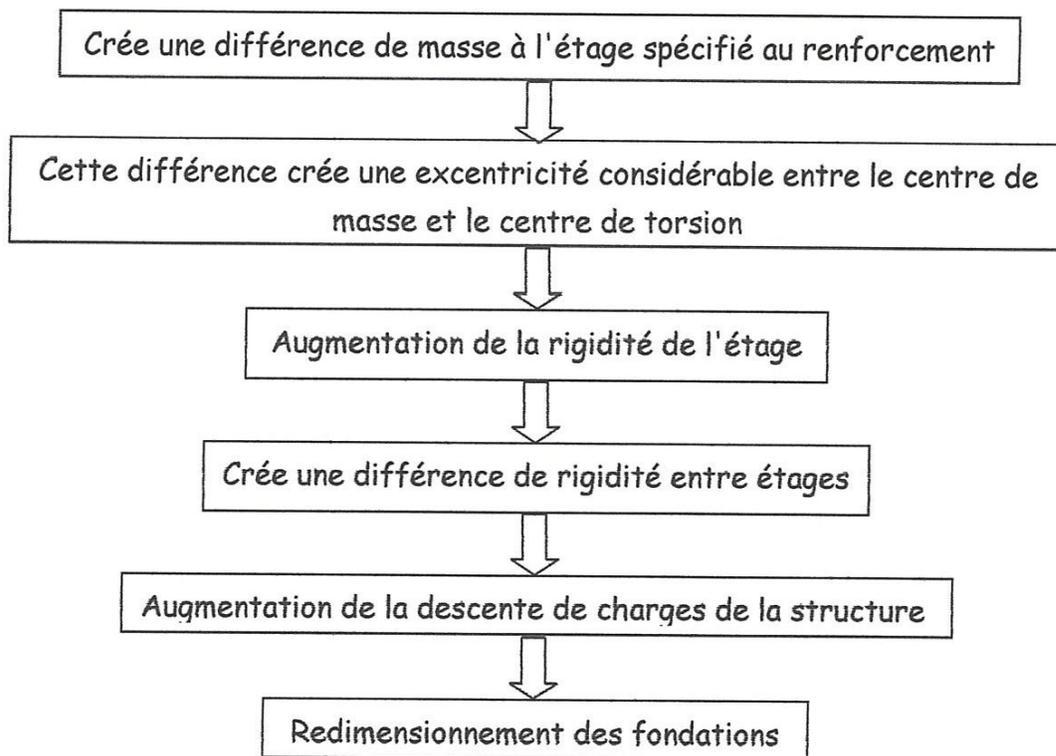


Figure IV-4 Organigramme du processus de chemisage en béton armé

IV-3-4 RENFORCEMENT PAR GAINAGE METALLIQUE :

IV-3-4-1 INTRODUCTION :

Ce type de renforcement est utilisé généralement pour les poteaux ; l'union de la platine à la structure peut se faire par : Collage, vissage, ou bien ancrage.

D'une façon générale les surfaces à ragrées ne doivent pas représenter plus de 20% de la surface à encoller.

La colle doit être préparée en respectant le mode d'emploi du produit défini par le fournisseur.

L'encollage exige une couche de colle sur le plat d'acier et sur la paroi du béton. Le meilleur outil pour étaler régulièrement la colle et assurer l'épaisseur moyenne requise est la spatule crantée. Pour un collage efficace, il est indispensable de maintenir la colle sous pression pendant la durée de prise, le temps pendant lequel l'effort de serrage est maintenu doit être fonction de la viscosité de la colle et de la largeur des plats d'acier (Serre-joint, barres filetées, les étais).

Pendant la prise de la résine de collage, il est recommandé d'éviter tout effet vibratoire, en particulier tout mouvement issu de trafic répété, ou d'effets dynamique de machines.

Les plats doivent être protégés en fin des travaux contre la corrosion avec une peinture de type époxy compatible avec le primaire de protection provisoire.

Dans le cas où la structure doit satisfaire à des exigences de stabilité au feu, une protection des plats doit être prévue pour éviter que le film de colle ne dépasse une température jugé critique. Cette protection peut être réalisée par l'utilisation de produit isolant.

Il est à noter que le renfort avec les platines en acier présente des inconvénients tels :

- le découpage des platines se fait généralement en atelier.
- les longueurs sont limitées.
- le transport n'est pas toujours aisé.
- l'étalement des éléments structuraux est parfois nécessaire.
- la durabilité vis-à-vis de la corrosion et la fatigue pose problème.

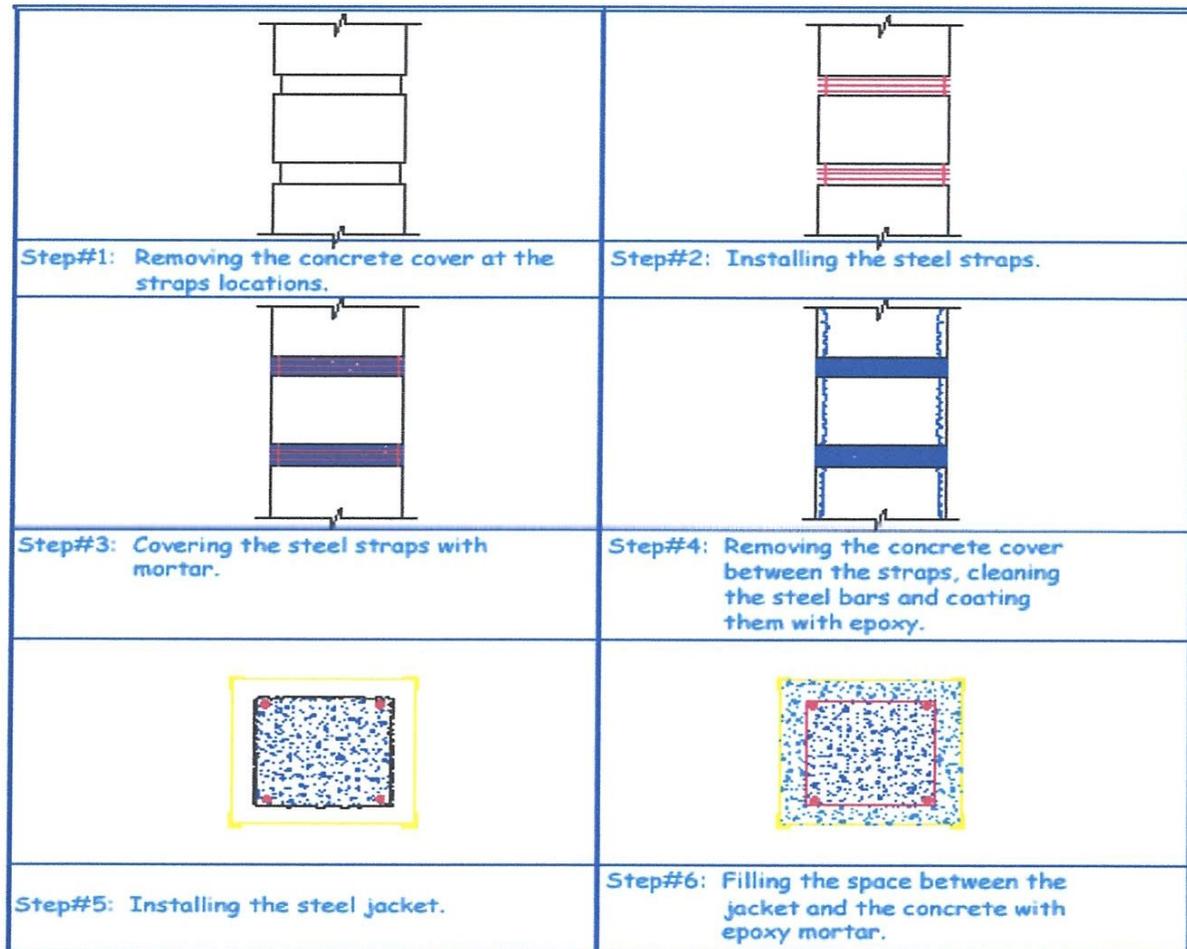


Figure IV-5 Différents étapes renforcement d'un poteau par gainage métallique

IV-3-5 LE RENFORCEMENT AU MOYEN DE PROFILES METALLIQUES :

L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. La réalisation ainsi d'une structure mixte acier-béton dont il faut assurer la compatibilité entre ces deux matériaux est indispensable et nécessaire.

Cette compatibilité entre les deux matériaux est liée directement à la qualité de l'interface (acier-béton) pour bien transmettre les efforts internes.

L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier, et leur montage s'effectue à l'aide de cheville ou tiges ancrées.

L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et mise en place.

1- Création de rainures autour du poteau.

- 2- Installation de bandes métallique.
- 3- Enrobage des bandes avec un mortier.
- 4- Repiquage de l'enrobage du béton jusqu'à l'apparition des armatures.
- 5- Installation de gainage métallique.
- 6- Remplissage du vide avec un béton maigre et plastique.

L'inconvénient majeur de cette méthode de renforcement tient à la précision qui est requise lors du mesurage de la structure existante, si les éléments fournis se positionnent correctement au montage. Il est recommandé d'envisagé des possibilités d'ajustement et de positionnement des pièces métalliques pré-forées vis-à-vis de forages dans le béton, lors du montage, contrairement aux constructions métalliques nouvelles.



Figure IV-6 Le renforcement au moyen de profilés métalliques

IV-3-6 LE SCHELLEMENT D'ARMATURES POUR BETON ARME :

Les scellements d'armatures dans le béton armé sont habituellement utilisés pour résoudre les problèmes d'oublis d'armatures en attente, l'extension d'un ouvrage ou bien dans le but d'assurer la continuité d'éléments préfabriqués. Les scellements sont réalisés à l'aide de mortier à base de liants hydrauliques ou de résines dont les constituants du mélange sont pré-dosés. Dans ce dernier cas, le scellement peut être réalisé à volume prédéterminé (scellement chimique obtenu par broyage d'une ampoule prêt à l'emploi), ou à volume à la demande comme les scellements chimiques réalisés par mélange d'une résine et durcisseur par l'intermédiaire d'une buse et d'un pistolet ou bien à partir d'un kit.

Il est important de signaler qu'il existe une certification concernant les produits spéciaux pour construction en béton, dont les produits de scellement et de calage, et a pour but de garantir l'aptitude à l'emploi du produit de

de calage, et a pour but de garantir l'aptitude à l'emploi du produit de scellement dont notamment ses performances minimales, ayant reçu un avis favorable d'un contrôleur technique.

IV-3-7 ADJONCTION DE MATERIAUX COMPOSITES :

IV-3-7-1 LES MATERIAUX COMPOSITES DANS LE GENIE CIVIL :

L'intérêt des solutions de réparation par matériaux composites dépend essentiellement des propriétés mécaniques spécifiques des fibres, des performances de tenue à la corrosion des polymères et de la facilité de pose et de formage sur les structures à réhabiliter.

Un matériau composite est issu de l'association de tissus de fibres haute résistance noyés dans une matrice polymère. Les polymères les plus couramment utilisés dans le génie civil, sont les polyesters insaturés ou les résines époxydes. Ces dernières sont souvent préférées aux autres polymères pour leur bonne mouillabilité sur une grande variété de substrats, leur grande gamme de viscosité, leur adhésivité élevée et leur excellente résistance chimique.

Les trois grandes familles de renfort actuellement utilisées dans l'industrie des matériaux composites sont le verre, l'aramide et le carbone. Cependant, de par leurs excellentes propriétés spécifiques, les fibres de carbone sont généralement préférées lorsque les contraintes de coût le permettent. Les tissus utilisés sont le plus souvent des nappes unidirectionnelles, des toiles ou taffetas. Ceci fera l'objet du paragraphe 2 qui présentera les domaines d'usage de chaque famille de renfort.

Il existe différentes techniques de réparation par matériaux composites : le collage de plats composites ou bien l'imprégnation des renforts in situ sur la structure à réparer. Dans tous les cas, les phénomènes qui donnent lieu à l'adhésion apparaissent lors du contact de la résine sur le support.

VI-3-7-2 LES POLYMERES DANS LE GENIE CIVIL.

VI-3-7-2-1 DEFINITIONS :

Les polymères sont constitués d'un grand nombre de monomères, lesquelles sont des molécules organiques dont le noyau est essentiellement constitué d'atomes de carbone. L'atome de carbone, qui possède quatre électrons de valence, peut établir des liaisons covalentes avec des atomes de même nature ou de nature différente. L'énergie de liaison entre les divers atomes est relativement élevée. C'est par réaction de polymérisation à partir des

monomères que se forment les polymères. On distingue deux grandes catégories de polymères selon leur structure :

- Les polymères thermoplastiques (TP) : ce sont des polymères linéaires ou ramifiés où les macromolécules ne sont liées entre elles que par des liaisons de faible intensité.
- Les polymères thermodurcissables (TD) : ce sont des polymères constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules. Ils sont amorphes et infusibles. Toutes les liaisons atomiques sont de forte intensité et, contrairement aux thermoplastiques, il ne peut y avoir aucun déplacement des chaînes les unes par rapport aux autres. On appelle ces matières thermodurcissables parce que, en général, une élévation de température favorise sa réaction de polymérisation et son degré de réticulation, donc sa rigidité.

IV-3-7-2-2 LES FIBRES DE RENFORT : [HAMELIN P, 2002]

Les fibres de renfort permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du polymère qui sert de matrice au matériau composite. On peut les rencontrer sous forme de fibres tissées ou en mâts. Les trois grandes familles de fibres actuellement utilisées sont le carbone, l'aramide et le verre. Cependant, malgré leur coût assez élevé, les fibres de carbone possèdent un ensemble de propriétés physiques et mécaniques qui en font un matériau de renforcement de toute première qualité dans l'industrie du génie civil. Leurs propriétés sont les suivantes :

- Une grande résistance et un haut module d'élasticité en traction longitudinale.
- Une grande résistance à la fatigue et à la déformation.
- Une faible masse volumique.
- Une grande résistance à l'usure.
- Absorption des vibrations.
- Une grande stabilité dimensionnelle.
- Une grande stabilité thermique (pratiquement incombustible).
- Une bonne conductivité thermique et électrique.
- Une grande résistance à la corrosion vis-à-vis des acides, des bases, des sels et des produits organiques.

Le Tableau IV-1 donne un ordre de grandeur des caractéristiques des fibres traditionnellement utilisées dans le domaine des composites.

Les fibres de verre et d'aramide sont plus économiques mais les premières ont un faible module et manquent de résistance face aux solutions salines et/ou

Chapitre IV

basiques. Les secondes présentent un faible module, une résistance à la fatigue limitée en milieu aqueux et une tenue thermique limitée.

Filament	Diamètre (µm)	Densité	Résistance à la traction (MPa)	Module de traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Température de fusion (°C)
Verre E	3 à 30	2,54	3 400	73 000	4,5	850
Verre D	3 à 30	2,14	2 500	55 000	4,5	-
Verre R	3 à 30	2,48	4 400	86 000	5,2	990
Carbone HR	8	1,78	3 500	200 000	1	2 500
Carbone HM	8	1,8	2 200	400 000	0,5	2 500
Aramide HR	12	1,45	3 100	70 000	4	480
Aramide HM	12	1,45	3 100	130 000	2	480

Tableau IV-1 Propriétés des différentes fibres.

IV-3-7-3 PROPRIETES DES RESINES EPOXYDES :

IV-3-7-3-1 PROPRIETES MECANIKES :

Les propriétés mécaniques des résines époxydes peuvent être assez variables selon leur formulation. Elles sont rassemblées dans le Tableau IV-2.

Caractéristiques	Valeur moyenne
Résistance à la traction (MPa)	70 à 80
Allongement à rupture en traction (%)	1 à 1,5
Résistance à la compression..... (MPa)	140 à 150
Résistance à la flexion..... (MPa)	110 à 130
Allongement à rupture en flexion..... (%)	1,2 à 1,7
Module de traction (GPa)	3 à 10
Coefficient de Poisson.....	0,35

Tableau IV-2 Propriétés mécaniques des résines époxydes. [BARDONNET P, 1992]

Le comportement mécanique de la résine va dépendre de sa température d'utilisation par rapport à la température de transition vitreuse. Cette transition marque, en effet, une brusque variation de beaucoup de propriétés physiques du matériau (Figure IV-7). En dessous de T_g , la mobilité moléculaire est très réduite et ne permet pas d'atteindre l'équilibre. Le polymère se trouve à l'état vitreux. Ses propriétés dépendent essentiellement de la densité d'énergie de cohésion qui est directement liée à la structure moléculaire du matériau. Au dessus de T_g , les mouvements moléculaires sont suffisamment

rapides pour que l'on soit toujours à l'équilibre de la structure et le polymère se trouve à l'état caoutchouteux. Ses propriétés sont indépendantes de la structure moléculaire et dépendent principalement de la densité de réticulation du réseau. [PASCAULT J. P et al, 2002]

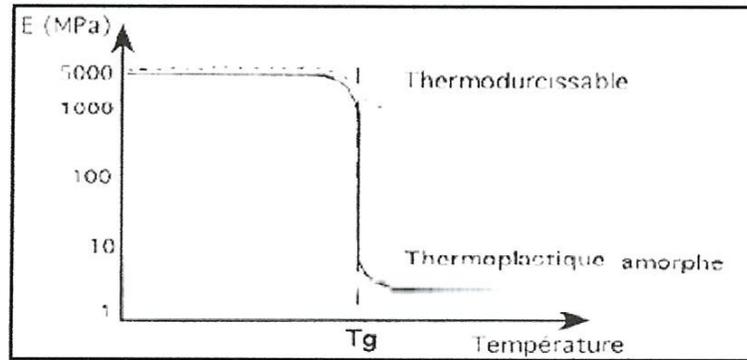


Figure IV-7 Evolution du module d'Young avec la température. [ROYA, 1994]

IV-3-7-3-2 DURABILITE :

[WU.L, al, 2004] ont étudié l'influence de l'eau, ils ont montré que la présence d'eau distillée en faible quantité accélère la réaction de polymérisation et améliore les propriétés mécaniques des résines.

[MICELLI F, al, 2004] ont, quant à eux, réalisé une étude comparative sur la tenue de différents composites en environnements agressifs tels que l'immersion en solution alcaline ou l'exposition à des cycles de gel-dégel, d'humidité, de température... Les éprouvettes soumises à un vieillissement accéléré en milieu alcalin ont été immergées dans une solution d'eau distillée contenant 0,16% de Ca(OH)₂, 1% de Na(OH), 1,4% de K(OH). La température choisie pour accélérer le vieillissement est de 60°C et le temps d'immersion est de 21 et 42 jours. Selon [LITHERLAND K, al, 1981] ces durées peuvent être assimilées à des temps réels d'exposition qui sont respectivement de 14 et 28 ans. Les conclusions tirées de ces recherches montrent une très bonne tenue des résines époxydes lorsqu'elles sont exposées à un milieu basique. Le gain de masse de ces résines est très faible (0,05% après 900h), les propriétés mécaniques ne sont pas affectées et l'interface fibres/matrice est intacte. D'autres études sur les résines polyester ou vinylester [CHIN JW et al, 1997] sont arrivées, après 100h d'immersion en eau salée à 60°C ou en eau interstitielle du béton, à constater une perte de masse du polyester alors que le vinylester devient stable après un gain de masse sur les 50 premières heures.

Peu d'études ont réellement été menées sur la tenue des résines époxydes en environnement alcalin représentatif de l'eau interstitielle de béton. [ZHANG S, et al, 1999] présentent des exemples de solutions référencées dans la littérature pour étudier le vieillissement des adhésifs utilisés dans le génie civil. Ils précisent qu'il n'est pas rare de voir des chercheurs qui ne prennent en compte que la basicité de la solution ou seulement la présence de divers sels sans vérifier la composition d'une solution contenue dans les pores du béton.

La conclusion qui peut malgré tout être tirée de ces études, est que la tenue des résines époxydes en présence d'ions alcalins et d'un PH fortement basique est meilleure que celle des autres résines testées. Elles présentent une faible absorption d'eau lorsqu'elles sont en immersion pendant plusieurs jours, et leurs propriétés mécaniques ne sont pas modifiées de manière significative. Il a été noté tout de même qu'une trop forte quantité d'eau devient néfaste pour la résine.

IV-3-7-4 LES THEORIES DE L'ADHESION :

IV-3-7-4-1 THEORIE DU MOUILLAGE : [COGNARD J.G, 2004]

L'adhésion se produit lorsqu'un polymère liquide mouille suffisamment (aspect thermodynamique) et rapidement (aspect cinétique) la surface de l'adhérent. L'expérience nous montre que lorsqu'une goutte de colle est déposée sur une surface solide, celle-ci possède un angle de contact fini avec la surface et le mouillage n'est que partiel. La goutte de colle demeure sur la surface jusqu'à durcissement. Il n'est pas possible de déposer un film mince de colle sur une surface sans avoir recourt à un solvant ou à un surfactant. Ceci n'empêche pourtant pas la colle de coller si l'on force le mouillage par pression sur l'adhérent. Le mouillage favorise donc l'adhésion mais ce n'est pas une condition nécessaire.

IV-3-7-4-2 THEORIE DE L'ANCRAGE MECANIQUE :

L'idée du modèle d'adhésion mécanique est que l'adhésif liquide pénètre dans les pores de la phase solide, l'adhérence étant assurée après réticulation, par l'effet d'interpénétration mécanique. Les pores et aspérités représentent un terrain où l'adhésif peut s'accrocher par de simples effets géométriques. La rugosité est un facteur favorable à une bonne adhérence puisqu'elle permet d'augmenter l'aire de contact et le nombre de sites de réaction. Cependant une rugosité trop importante peut avoir pour conséquence un mauvais mouillage du substrat par l'adhésif. De l'air ou de l'eau piégé dans les creux, créent des

zones de sur-contraintes dues à un mauvais contact substrat / adhésif provoquant des amorces de rupture.

IV-3-7-4-3 THEORIE DES INTERACTIONS MOLECULAIRES : [COURARD L, 1999]

Les théories moléculaires de l'adhésion sont basées sur l'idée que des forces intermoléculaires peuvent affecter l'adhésion entre différentes phases. L'effet de ces forces de liaison est basé sur la formation de champs électriques. L'orientation de ces champs, leur intensité, leur distance permettent de les classer en deux catégories fondamentales : les forces de Van Der Waals et les liaisons hydrogènes.

Les premières n'ont pas d'orientation privilégiée et s'exercent sur des distances relativement longues. Leur énergie de liaison est inférieure à 40 kJ/mole. Les liaisons par pont hydrogène sont dirigées dans l'espace et sont plus fortes que les forces de Van Der Waals. Leur énergie de liaison est d'environ 50 kJ / mole.

IV-3-7-4-4 THEORIE DES LIAISONS CHIMIQUES :

Cette théorie considère l'établissement de véritables liaisons chimiques entre groupements actifs des chaînes polymériques et de la surface du substrat. L'efficacité du couplage chimique varie étroitement avec deux paramètres : le nombre de liaisons interfaciales et la longueur des chaînons assurant le couplage. Ces liaisons mettent en œuvre des énergies beaucoup plus grandes que les précédentes. Les liaisons chimiques peuvent être classées en trois catégories : les liaisons covalentes dont l'énergie de liaison est comprise entre 60 et 700 kJ/mole, les liaisons métalliques dont l'énergie est comprise entre 110 et 260 kJ/mole et les liaisons ioniques dont l'énergie est comprise entre 600 et 1000 kJ/mole.

IV-3-7-4-5 THEORIE DES COUCHES INTERFACIALES DE FAIBLE COHESION :

Lorsqu'un assemblage substrat / adhésif est réalisé, plusieurs interfaces ou interphases sont créées. Ce sont des zones dans lesquelles les propriétés physico-chimiques sont différentes de celles du polymère et du substrat. Il est possible que la rupture de l'assemblage ne se propage pas strictement à l'interface mais dévier en suivant un chemin près de l'interface dans la masse de l'un ou l'autre des composants. La fracture est alors cohésive et a lieu dans une

zone où la résistance mécanique est faible. Bikerman a proposé une liste de sept types de couches interfaciales de faible cohésion qui peuvent par exemple être dues à la présence de poches d'air, d'impuretés ou bien issues de réactions entre composants et milieu.

IV-3-7-4-6 LE COLLAGE EN MILIEU POREUX : cas du béton. [VAYSBURD A.M, 2001]

L'adhésion en milieu poreux résulte d'un processus en plusieurs étapes : la première correspondant à l'établissement du contact entre les matériaux, la création de liaisons plus fortes, susceptibles d'assurer le maintien du contact entre les matériaux, s'effectuant dans une seconde étape. La théorie du mouillage permet d'expliquer l'établissement d'un contact intime entre les matériaux pour que des liaisons puissent éventuellement se créer (théories des interactions moléculaires et des liaisons chimiques).

La théorie de l'ancrage mécanique dans le réseau poreux vient ensuite compléter les précédentes théories, en contribuant à accroître le champ des forces interfaciales grâce à l'augmentation de l'aire de contact effective ainsi qu'à la tortuosité du réseau. La résine déposée sur le béton pénètre progressivement dans les pores pour former une zone dite de transition ou interphase.

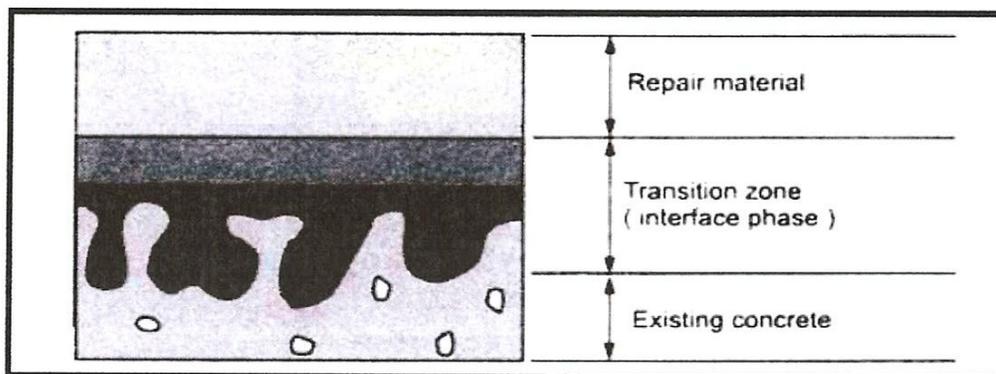


Figure VI-8 Modèle idéalisé d'une surface réparée

[CARDON A.H et al, 1986] ont montré qu'une résine déposée sur une surface de béton crée une zone de transition dont les propriétés sont caractéristiques de la qualité de l'adhésion. Ils considèrent que l'adhésion est totale lorsque l'épaisseur de la zone de transition est infinie. De plus, si la couche adhésive est fine, ils font le postulat que les propriétés de la zone de transition et l'influence des facteurs environnementaux sur celles-ci, conditionnent la qualité de l'assemblage. A l'inverse, si la couche adhésive est épaisse, ce sont les

propriétés massives de l'adhésif qui conditionnent l'adhérence. Suite à diverses études menées ces dernières années, plusieurs paramètres caractéristiques des matériaux et de l'environnement dans lequel s'effectue l'assemblage ont été identifiés comme ayant une influence primordiale dans la création de la zone de transition :

- La rugosité et la porosité du béton contribuent toutes deux à augmenter l'aire de contact effective, favorisant un meilleur ancrage mécanique. Il est alors nécessaire de réaliser un traitement de la surface à revêtir afin, dans un premier temps, d'éliminer la couche de très faible cohésion en surface ainsi que toute présence d'huile ou autre agent polluant, mais également pour obtenir une surface de rugosité souhaitée et ouvrir les porosités surfaciques. [TOUTANJI H et al, 2001] ont montré l'influence du traitement effectué à la surface du substrat sur l'adhésion d'un composite sur un support en béton. Celle-ci semble être liée au niveau de rugosité obtenu sur le substrat après un traitement par sablage ou par jet d'eau sous haute pression. En effet, la rugosité a un effet direct sur la valeur de l'angle de contact et par conséquent sur la mouillabilité du support. Néanmoins, un traitement trop agressif peut entraîner une forte rugosité, néfaste à la bonne tenue du revêtement. De l'air peut rester piégé et provoquer par la suite une décohésion du revêtement. Il n'y a pas systématiquement de corrélation entre la force d'adhésion et la rugosité de surface du substrat, puisque des liaisons fortes peuvent être obtenues sur des matériaux de très faible porosité comme le verre. [PRIN D, 1996] affirme d'ailleurs que l'absorption d'un liquide par mouillage de la surface solide est d'autant meilleure que la rugosité de cette surface est faible.

Par ailleurs, un support poreux signifie aussi une surface de contact plus grande, ce qui a pour effet d'augmenter l'énergie de rupture nécessaire à la séparation des matériaux assemblés. Ainsi, la porosité ouverte du béton est un paramètre essentiel puisqu'elle gouverne l'imprégnation de la surface par la résine. Ainsi selon [MUNGER C.G et al, 1997], la qualité de l'adhésion d'un revêtement et sa durée de vie seraient proportionnelles à la profondeur de pénétration de la résine.

- La teneur en eau du béton : pour que la pénétration de la résine soit optimale, les pores du béton doivent être vides, en particulier d'eau. Le support peut être humide mais ne doit pas être saturé en eau. En effet, si le support est saturé, le phénomène de capillarité n'existe pas.

Pour pénétrer la résine devra évacuer une partie de l'eau. La seule possibilité est alors que la mouillabilité de la résine soit supérieure à celle de l'eau. [SASSE

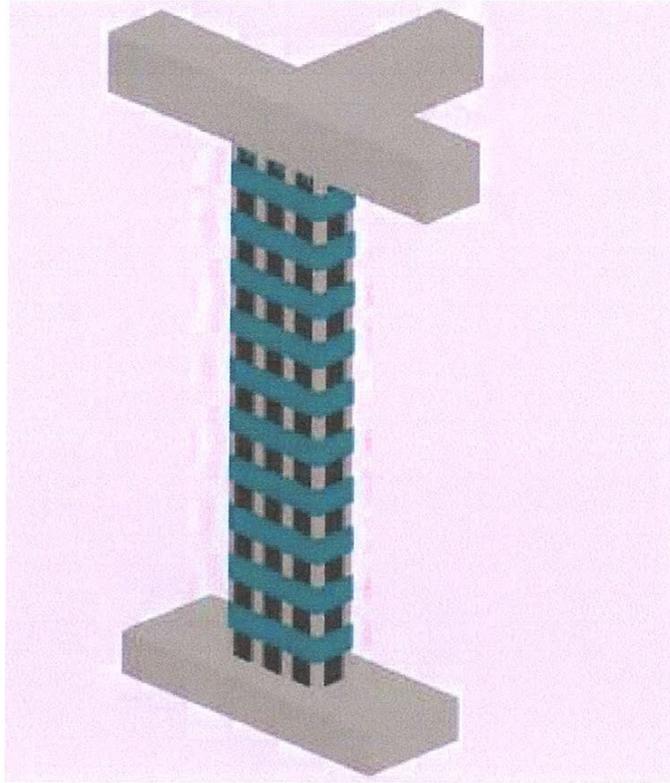


Figure VI-10 Renforcement de poteau : dans le sens longitudinal vis-à-vis de la flexion ; et dans le sens radial (confinement) vis-à-vis la compression.

Chapitre V
DIAGNOSTIC DES REPARATIONS ET
RENFORCEMENTS

V- CARACTERISATION DE L'ADHERENCE.

V-1 MODES DE RUPTURE :

Les essais mécaniques pratiqués sur les assemblages collés permettent de déterminer l'adhérence des matériaux joints. L'objectif de ces essais mécaniques est d'évaluer les conditions de rupture des adhésifs et d'en déterminer la durée de vie du joint. Au niveau de l'assemblage de deux matériaux A et B, on définit l'interface comme la zone en deux dimensions qui sert de frontière et l'interphase est la zone où les propriétés physico-chimiques et mécaniques sont différentes à la fois de A et de B. Lors d'un essai d'adhérence, on peut distinguer plusieurs cas de rupture Figure V-1 :

- Une rupture cohésive lorsqu'elle ne se produit pas à l'interface. Dans ce cas, la cohésion du matériau ou de l'interphase qui a cédé est plus faible que l'adhésion des deux partenaires. La rupture peut alors être cohésive dans le béton ou dans le polymère.
- Une rupture adhésive lorsqu'elle se produit à l'interface et la cohésion de chacun des matériaux est meilleure que leur adhésion.
- Une rupture mixte lorsqu'elle est à la fois cohésive par endroits et adhésive à d'autres. Notons que la distinction entre rupture adhésive et cohésive dépend de l'échelle d'observation. La présence du composé A sur la surface B non observée à l'œil nu, peut parfois être détectée par des méthodes d'analyse de surface.



Figure V-1 Modes de rupture de joints collés.

Les joints collés peuvent être sollicités de diverses manières : traction, cisaillement, flexion, fluage. L'adhérence et les autres propriétés mécaniques des adhésifs et des joints collés sont donc mesurées selon différentes techniques.

V-2 MODES DE SOLLICITATION : [COGNARD J.G, 2004]

Les différents essais de caractérisation mécanique des assemblages collés sont répertoriés dans le tableau 1. Si on regarde le comportement mécanique des matériaux polymères et cimentaires, on constate une forte différence de propriétés. En effet, la résistance en traction des résines époxydes est environ dix fois supérieure à celle du béton qui est un matériau fragile. Néanmoins, si l'on considère le module élastique le rapport de proportion est inversé. Pour choisir et interpréter correctement les essais qui sont menés pour caractériser l'adhérence d'un assemblage béton / résine il est important de prendre en

considération le fait que le béton sera le facteur limitant à toute sollicitation mécanique.

La résistance à la rupture en cisaillement des joints en recouvrement simple est la valeur la plus largement utilisée par les constructeurs, comme les fournisseurs, pour décrire les propriétés d'un collage. Le principe de l'essai consiste à mesurer la force nécessaire à la rupture en soumettant le joint à une force de vitesse constante. Cependant, la signification de la valeur mesurée est relative à la géométrie de l'essai et au procédé d'assemblage. Pour éviter la déformation créée par le désalignement du joint, des essais en double recouvrement ont été développés. Curieusement, les substrats se déforment quand même pendant l'essai et les valeurs obtenues sont comparables à celles de l'essai en simple recouvrement. Des efforts de traction apparaissent dans le béton, créant une rupture cohésive. Il est, dans ce cas, impossible de conclure sur la résistance de l'interface puisque l'apparition de contraintes secondaires entraîne une rupture prématurée dans le substrat.

L'essai d'arrachement, de par sa facilité d'utilisation sur site, est celui qui est généralement préconisé dans l'industrie du génie civil. Il consiste à appliquer un effort de traction sur le revêtement à tester. Il est cependant assez peu reproductible et ce principalement à cause de problèmes d'alignement du système d'ensemble. Les conditions de traction ne sont pas toujours symétriques durant la totalité de l'essai (variation d'épaisseur du revêtement, asymétrie des mors, mauvaise planéité du substrat...).

Le blister test, appelé également test de cloquage, consiste à introduire un gaz ou un liquide sous pression à travers le substrat préalablement percé. Un défaut de collage au niveau du trou permet d'initier la fracture à l'interface. Lorsqu'on applique une pression il se forme une cloque dont la taille augmente progressivement, jusqu'à une pression critique qui provoque le décollement du revêtement. Cet essai est intéressant et permet d'obtenir de bons résultats, mais sa validité est limitée aux adhérences moyennes ou faibles. Lorsque l'adhérence est forte, le film éclate.

Les contraintes liées à la réalisation des essais ainsi qu'à la géométrie des éprouvettes, entraînent bien souvent des problèmes d'alignement et font apparaître des contraintes secondaires. Un revêtement appliqué sur une surface verticale est principalement soumis à des efforts de cisaillement. Cependant, la sollicitation appliquée est rarement pure et combine souvent des contraintes normales et tangentielles. Le faible comportement en traction du béton implique systématiquement des ruptures cohésives dans le substrat. L'essai le plus facile à mettre en œuvre étant l'essai d'arrachement, il a été décidé de le sélectionner pour caractériser l'interface de nos assemblages.

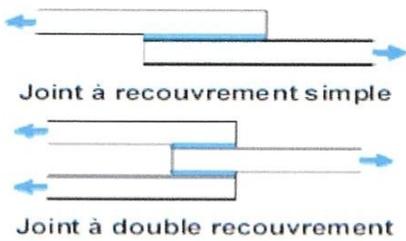
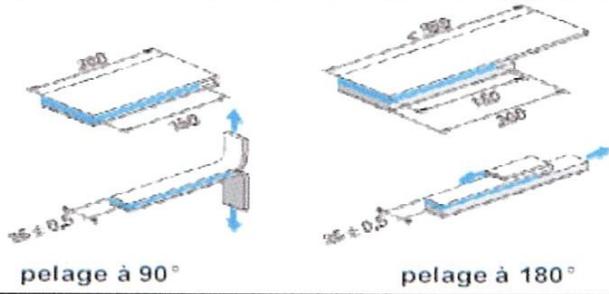
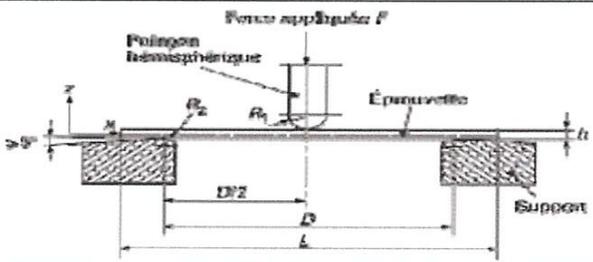
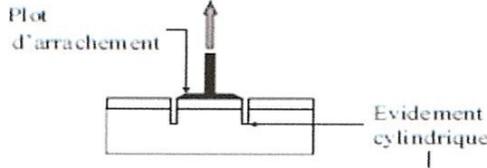
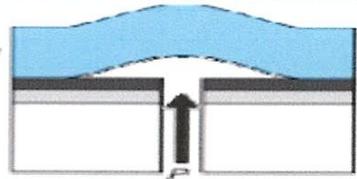
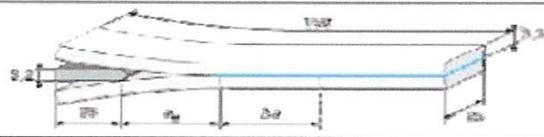
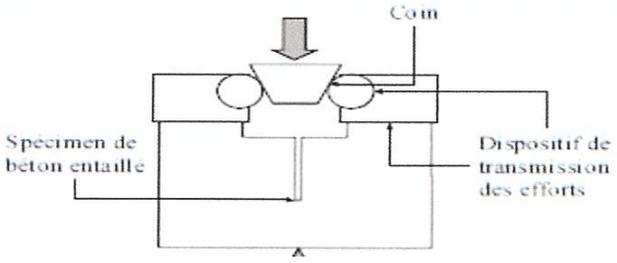
Sollicitation par cisaillement :	 <p>Joint à recouvrement simple</p> <p>Joint à double recouvrement</p>
Sollicitation par pelage :	 <p>pelage à 90°</p> <p>pelage à 180°</p>
Sollicitation par flexion :	 <p>Force appliquée F</p> <p>Poutre hémisphérique</p> <p>Éprouvette</p> <p>Support</p> <p>$D/2$</p> <p>D</p> <p>L</p>
Sollicitation d'arrachement :	 <p>Plot d'arrachement</p> <p>Evidement cylindrique</p>
Blister test :	
Wedge test :	
Wedge splitting test :	 <p>Coin</p> <p>Specimen de béton entaillé</p> <p>Dispositif de transmission des efforts</p>

Figure V-2 Modes de sollicitation d'un joint cohésif

V-3 DYNAMOMETRE DE TRACTION :

Principe de l'essai d'arrachement : [HOLLAWAY L.C et al, 1999]

L'essai d'arrachement consiste à coller un plot métallique sur la surface revêtue et à appliquer un effort de traction jusqu'à la rupture (Figure V-3). Les plots utilisés dans le cadre de ce travail sont des plots en aluminium de largeur 50 mm- La norme NF EN 24624 préconise de pratiquer une entaille dans le revêtement tout autour du plot jusqu'au substrat, à l'aide d'une scie. La force appliquée sur le plot est progressivement augmentée à une vitesse constante, jusqu'à une force maximale correspondant à la rupture. La contrainte d'arrachement est calculée comme le rapport de la force maximale sur la surface du plot

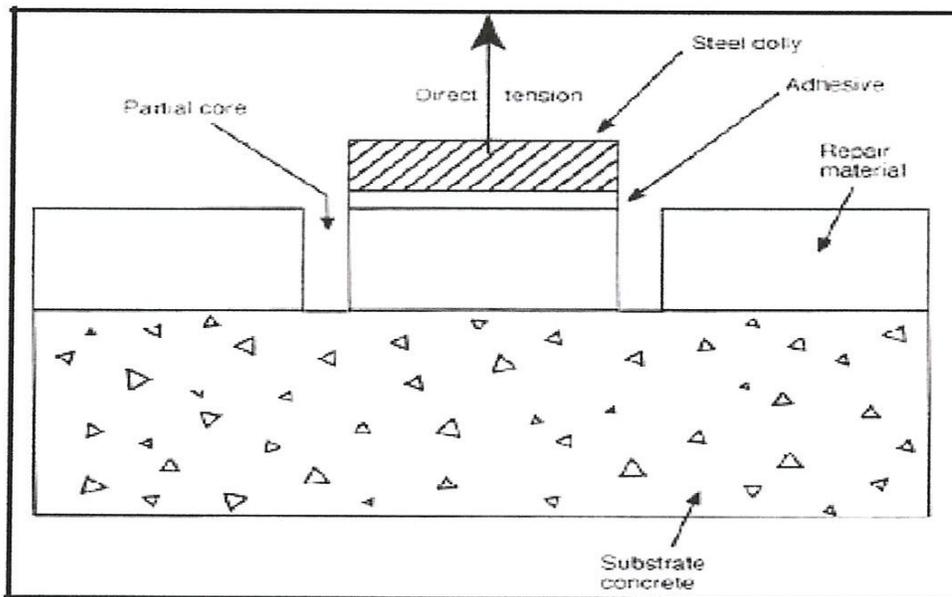


Figure V-3 Configuration d'un essai classique d'arrachement

Ce type d'essai est fréquemment utilisé sur site pour contrôler l'adhérence d'un matériau composite sur du béton en raison de la facilité de réalisation d'une telle mesure. Il existe des dynamomètres à trois pieds qui viennent se fixer sur la surface et saisissent le plot afin de lui appliquer l'effort de traction. Dans le cas où la rupture survient dans le béton, l'essai est considéré comme satisfaisant puisqu'il implique que la force d'adhésion entre les deux matériaux est supérieure à la résistance même du béton.

La réalisation de tels essais entraîne une grande dispersion des résultats obtenus. Lors de la découpe pratiquée autour du plot il est difficile de s'assurer que le trait de scie s'arrête systématiquement au niveau de l'interface résine-

pâte de ciment, principalement à cause des épaisseurs variables de résine déposée.

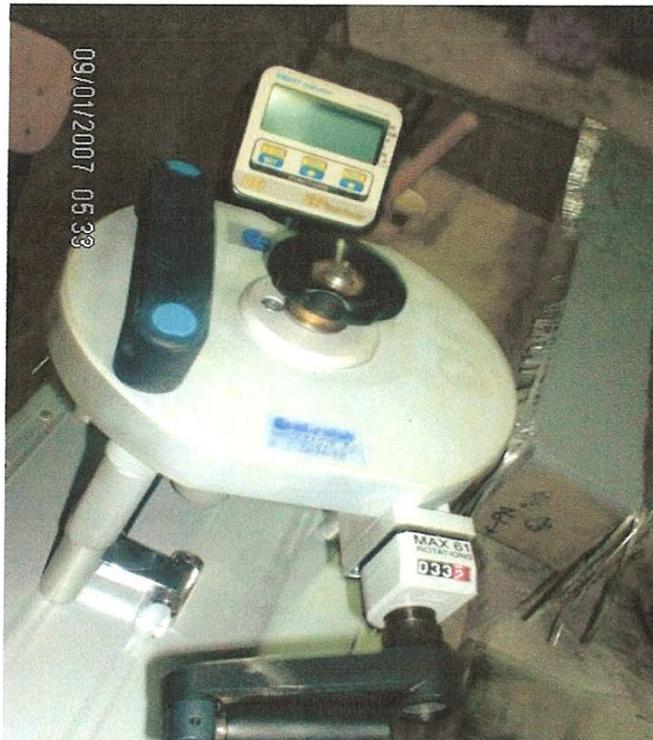


Figure V-4 Dynamomètre de traction utilisé

V-4 ESSAI DE COMPRESSION : [GORISSE F, 1978]

L'essai lui même doit être conduit rigoureusement pour obtenir de bons résultats. On observera en particulier :

- Un bon centrage de l'éprouvette ;
- Une vitesse de chargement donnée ;
- La transcription immédiate du résultat et de tout renseignement utile.

Présentation de la presse utilisée (essai de compression) : [KEDJOUR N.E, 2003]

Les éprouvettes sont placées entre les plateaux d'une presse. Elles sont placées de telle façon que l'axe des sections de compression soit centré sur la rotule du plateau supérieur, et la charge appliquée doit croître (une vitesse de montée en charge constante de 0.5 Mpa par seconde \pm 0.2 Mpa par seconde), jusqu'à la rupture et on mentionne le résultat d'essai d'écrasement selon la norme NF P.18-406. On considère, bien que l'état des contraintes dans l'éprouvette soit assez complexe, que la rupture se fait en compression simple.

La contrainte a pour expression :

$$f_c = \frac{P_{\max}}{S}$$

Avec $S = 200 \text{ cm}^2$ pour une éprouvette 16×32 .



Figure V-5 La presse de compression utilisée

CONCLUSION

CONCLUSION :

Bien que le béton armé est le matériau de construction par excellence à cause de ses grandes qualités, et le matériau le plus utilisé dans la construction (surtout en Algérie), il a aussi des défauts, et dans ce projet nous avons vu quelques pathologies des diagnostics des ses défauts et les techniques de réparation, pour que nos constructions restent utilisables le plus longu temps possible, et pour mieux les exploités même après un séisme ou un changement d'utilisation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [THUMMEN F, 2004] THUMMEN F, Propriétés mécaniques et durée de vie de bétons réfractaires, thèse doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2004.
- [SOUTSOS M, et al, 2009] SOUTSOS M, BUNGEY John, LONG Adrian * and TICKELL Geoff, Interpretation of in-situ concrete strength test results, Department of Engineering, The University of Liverpool, UK (* : School of Planning, Architecture and Civil Engineering, Queen's University Belfast, UK) 2009
- [DGFZP, 2003] Deutsche Gesellschaft Für Zerstörungsfreie Prüfung E.V, Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003.
- [SHINOMIYA T, et al, 2002] SHINOMIYA T, NAKANISHI Y, MORISHIMA H, SHIOTANI T, Damage diagnosis technique for brick structures using AE, 2002, Proceedings of the 25th EWGAE.
- [SUARIS W, et al. 1995] SUARIS W, VAN MIER J.G.M, Acoustic emission source characterisation in concrete under biaxial loading, Materials and structures 1995.
- [C.N.E.R.I.B 2004] C.N.E.R.I.B, CYCLE DE FORMATION 2004
- [BEATTIE A.G, 1983] BEATTIE A.G, Acoustic emission, principles and instrumentation, Journal of Acoustici Emission, G.B, 1983.
- [NONNET E ,et al, 2000] NONNET E, LEQUEUX N, BOCH P, In situ ultrasonic study of high alumina castables, Canadian Metallurgical Quaterly, Canada, 2000.
- [MALISZKIEWICZ P, 1996] MALISZKIEWICZ P, Behaviour of concrete observed by acoustic emission measurement, Mareriels Science Forum, 1996.
- [LANDIS, 1999] LANDIS, Micro-macro fracture relationships and acoustic emissions in concrete, Construction and Building Materials, 1999.
- [SUZUKU H et al, 1996] SUZUKU H, KINJO T, HAYSUHISA Y, TAKEMOTO M, Wavelet transform of acoustic emission signals, Journal of Acoustic Emission, G.B, 1996.
- [TERRIEN M, 1980] TERRIEN M, Emission acoustique et comportement post critique d'un béton sollicité en traction. Bulletin de Liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées, France, 1980.
- [NIISEKI S et al, 1995] NIISEKI S, SATAKE M. Fundamental research for evaluating applied stress in concrete by the kaiser effect, Acoustic Emission V 1995.
- [ASTM, 1991] ASTM E610-82, (1991). Standard Definitions Relating to Acoustic Emission. Annual book of ASTM Standards, Vol. 2, Philadelphia, U.S.A, 2003.
- [ELVERY R.H et al, 1969] ELVERY R.H., DIN N.M, (1969). Ultrasonic Inspection of Reinforced Concrete Flexural Members. Proc. Symp. On Nondestructive Testing of Concrete and Timber, Institution of Civil Engineers, Londres.
- [LI F et al, 2000] LI F, LI Z, Acoustic emission monitoring of fracture of fiber

reinforced concrete in tension, *ACI Materials Journal*, 2000.

[KOLAITI E et al, 1993] KOLAITI E, PAPADOPOULOS Z, Evaluation of Schmidt rebound hammer testing : a critical approach, *Bulletin of the international association of engineering geology* 1993.

[HAMMOND E et al, 1955] HAMMOND E, ROBSON T.D. Comparison of Electrical Properties of Various Cements and Concretes. *The Engineer*, Vol. 155, Jan., Londres, 1955. [HUGUET S, 2002] HUGUET S, Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2002.

[PAPARGYRIS A.D et al, 2001] PAPARGYRIS A.D, COOKE R.G, PAPARGYRI S.A, BOTIS A.I. The acoustic behaviour of bricks in relation to their mechanical behaviour, *Construction and Building Materials*, 2001.

[GREEN A.T, 1970] GREEN A.T. Stress Wave Emission and Fracture of Concrete Reactor Vessel Materials. *Proc. Interamerican Conf. On Materials Technology*. American Society of Mechanical Engineers, Vol. I, 1970.

[SHIELD, 1997] SHIELD, Comparison of acoustic emission activity in reinforced and prestressed concrete beams under bending, *Construction and Building Materials* 1997.

[JONES R, 1969] JONES R, Testing of concrete by the ultrasonic pulse method, *materials and structures*, vol.2,N.10, July-August 1969.

[GIRY C et al, 2009] GIRY C, BOTTONI M, DUFOUR F, KOTRONIS P, MAZARS J, Endommagement et fissuration du béton armé, Laboratoire 3S-R (Sols, Solides, Structures-Risques), INPG/UJF/CNRS, Domaine Universitaire, BP 53, Grenoble, France, 2009.

[NDTCE, 2009] Non-Destructive Testing in Civil Engineering, June 30th - July 3rd, Nantes, France, 2009.

[SCHMIDT, 1951] SCHMIDT, A non destructive concrete tester. *Concrete* 1951.

[GRIEB, 1956] GRIEB, Use of the swiss hammer for estimating the compressive strength of hardened concrete. *Public Roads* 1956.

[POLDER, 2001] POLDER, Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, a RILEM TC-154 technical recommendation, *Construction and Building Materials* 2001.

[HAMELIN P, 2002] HAMELIN P, Renforcement des ouvrages d'art par matériaux composites. *Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites*, 2002.

[BARDONNET P, 1992] BARDONNET P, Résines époxydes: composants et propriétés, *techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites*, 1992.

[PASCAULT J. P et al, 2002] PASCAULT J. P. and al, *Thermosetting polymers*. Editions Marcel Dekker, New York, U.S.A, 2002.

[ROYA, 1994] ROY A., Comportement mécanique en sollicitation monotone et cyclique d'assemblages collés composite/composite et composite/acier, Thèse de doctorat

[HOLLAWAY L.C et al, 1999] HOLLAWAY L.C and LEEMING M. B.,
Strengthening of reinforced concrete structures, Woodhead publishing limited,
Cambridge, 1999.

[GORISSE F, 1978] GORISSE F, Essais et contrôle des bétons, Editions Eyrolles,
1978.

[KEDJOUR N.E, 2003] KEDJOUR Nasr-Eddine, Le laboratoire du béton, Office
des publications universitaires, Algérie, 2003.