

CHAPITRE II :

LES ESSAIS NON DESTRUCTIVES

Le niveau élevé atteint par la physique vers le milieu du **XX^e** siècle s'est manifesté également dans les méthodes d'essai des constructions. un vieux désir du constructeur, celui de prévoir la charge qui provoquerait la rupture d'une structure ou d'un élément sans les détruire et même sans les altérer commençait à se matérialiser. Ainsi apparaît les essais non destructifs qui contrôle la qualité directe de la construction. Pour cela on va décrire dans ce chapitre les principales méthodes non destructives en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients.

II.1. Introduction:

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

Pour cela on recourt aux essais non destructifs (END) du béton qui a une grande importance scientifique et pratique. Le sujet a suscité une attention croissante pendant des années ; particulièrement le besoin de caractérisation de qualité des constructions endommagées faites en béton, en utilisant des méthodes non destructives

Les avantages de ces essais par rapport aux autres peuvent être résumés comme suit :

- Essai d'une construction sans la détruire, ni nuire à sa capacité de service ;
- Possibilité d'obtenir des informations dans des domaines inaccessibles aux méthodes classiques (par exemple : observation in situ du durcissement du béton dans l'ouvrage, détermination et observation dans le temps du degré de corrosion des ouvrages) ;
- Supplément d'informations de caractère local, sous forme de données se rapportant à un grand volume de matériau, donc possibilité d'obtenir un tableau plus complet de l'homogénéité du matériau dans l'ouvrage ;
- Economie de matériaux, de temps et d'outillages d'essai par la possibilité de faire les essais sur le matériau dans l'ouvrage même ou sur une seule éprouvette un nombre pratiquement infini de fois, due à la rapidité de l'exécution de ce type d'essais et aussi

au fait qu'on peut remplacer certains outillages coûteux et dont la manipulation est délicate par des appareils simples et transportables.

II.1.1 Historique:

Williams en (1936) a lancé le premier essai non destructif, Après ça et pendant le développement de domaine de la construction, une gamme d'essais non destructifs in-situ, a été développée, par tant de chercheurs dans ce domaine comme : Ernest Schmilt (1948), Jones (1962), Whitehurst (1966), Malhotra (1976). Bungey (1982) a présenté une enquête complète de littérature pour les méthodes non destructives normalement utilisées pour l'essai et l'évaluation du béton,. Au milieu des années soixante Skramtaev et Leshchinsky (1966) ont proposé pour la première fois l'utilisation de deux méthodes non destructifs ensembles. Le travail le plus fondamental à ce sujet a été présenté par Facaoaru (1969). En (1991) Leshchinsky a récapitulé les avantages des essais non destructifs comme la réduction de la consommation de travail de l'essai, une diminution de la consommation de travail des travaux préparatoires, peu de dommages structuraux, l'utilisation d'équipement d'essai moins cher, par rapport à l'essai destructif. Ces avantages sont sans valeur si les résultats ne sont pas fiables.

Au cours de cette période, plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point.

II.1.2 Définition des essais non destructifs:

Les essais non destructifs (END) représentent des méthodes de reconnaissance couramment appliquées aux structures de bâtiments, ouvrage d'art ou de génie civil.

Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions. Etant entendu que quelques désordres mineurs peuvent être apportés à la structure sans toutefois modifier ni sa performance ni son apparence. Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles. Ces essais sont rapides et légers à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre des contrôles d'ouvrages neufs ou en construction et comme diagnostic d'état d'ouvrages anciens.

II.2 Les méthodes d'essais :

Il existe deux genres de méthodes pour l'estimation de la résistance de compression du béton. Les premiers, englobent les méthodes qui ne mesurent pas directement la résistance mais d'autres propriétés du béton, à partir, desquels, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests tel que

- ✓ Méthode de dureté superficielle ou essai au scléromètre
- ✓ Méthode de pénétration.
- ✓ Méthode ultra son.
- ✓ Méthode par carottage.

Les seconds types de tests sont ceux qui mesurent quelques propriétés de résistance, à partir desquels on peut faire une estimation de résistance du béton. Ces méthodes englobent des tests tel que l'essai d'arrachement.

II.2.1. Essai au scléromètre:

II..2.1.2 Introduction

La méthode de dureté superficielle consiste essentiellement à une auscultation du béton par une manière standard, en utilisant une masse donnée activée par une certaine énergie puis mesurer ensuite le rebondissement. Cette méthode est connue sous le nom de scléromètre Schmidt.

Cet essai est l'un des plus vieux essais non destructifs et il est encore très utilisé de nos jours il a été développé par Ernst Schmidt en (1948) et est connu sous le nom l'essai au marteau Schmidt ou essai au scléromètre. Le marteau de Schmidt (photo II.1) est resté le seul instrument connu qui utilise le principe de rebondissement pour les essais sur le béton selon R.F Feldman (1977). En (1984) Akashi. T et Amasaki .S ont déclaré que malgré son apparente simplicité, l'essai au scléromètre sous-tend des problèmes complexes d'impact et de propagation de l'onde qui lui sont associés.



Photo (II.1): Marteau de Schmidt ou le Scléromètre

II.2.1.2. Principe

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur laquelle frappe la masse, comme présenté sur la figure (II.1).

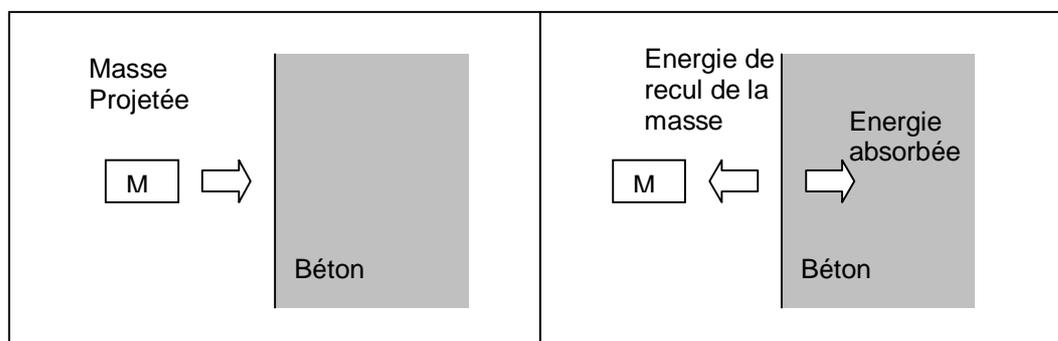


Figure (II.1): Principe du Scléromètre

Dans l'essai au scléromètre une masse approximative de 1.8 kg montée sur un ressort a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai. Lors de son relâchement, la masse rebondit depuis la tête, toujours en contact avec la surface du béton et la distance qu'elle parcourt, exprimée en pourcentage de l'extension initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.

En utilisant la méthode de dureté superficielle ou essai au scléromètre il faut tenir compte des éléments suivant :

- Dans le choix des zones d'essai, éviter la surface de coulée ou la face opposée, faire l'essai sur les surfaces parfaitement planes et lisses (sans rugosités) et préférablement une surface moulée. Un béton à texture ouverte ne peut donc pas être soumis à l'essai sclérométrique. Les surfaces lissées à la truelle doivent être poncées avec une pierre de carborundum (La pierre à polir).
- La zone choisie doit être représentative de l'élément soumis à l'essai et comprendre les régions fortement sollicitées et les régions soupçonnées d'être faibles dans l'élément. Si le béton soumis à l'essai ne fait pas parti intégrant d'un élément de grande dimension, il doit être supporté de façon rigide, car un déplacement en cours d'essai se traduit par un indice de rebondissement plus faible.
- Dans le choix des points d'essai, éviter les régions proches des arrêtes de l'élément (à moins de 5 cm pour les coffrages en bois et à moins de 3cm pour les coffrages métalliques) la distance entre les points d'essai doit être d'au moins 2cm. Il ne faut pas faire l'essai dans les pores visibles, l'essai au scléromètre est sensible aux variations locales dans le béton. Par exemple, la présence d'un gros granulat directement sous la tête du marteau donne un indice de

rebondissement anormalement élevé, à l'inverse, la présence d'un vide à la même position entraîne un résultat très faible. De plus, et selon ACI dans le manuel de béton partie 2 (1994) l'énergie absorbée par le béton est liée à la fois à sa rigidité et à sa résistance de sorte que c'est la combinaison de ces deux caractéristiques qui régit l'indice de rebondissement. W.E Grieb (1982) a utilisé le scléromètre pour estimer la résistance à la compression du béton lourd et a trouvé que la rigidité du béton est influencée par le type de granulat utilisé la figure (II.2) montre la relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement pour des bétons confectionnés avec différents granulats (W.E Grieb (1958))

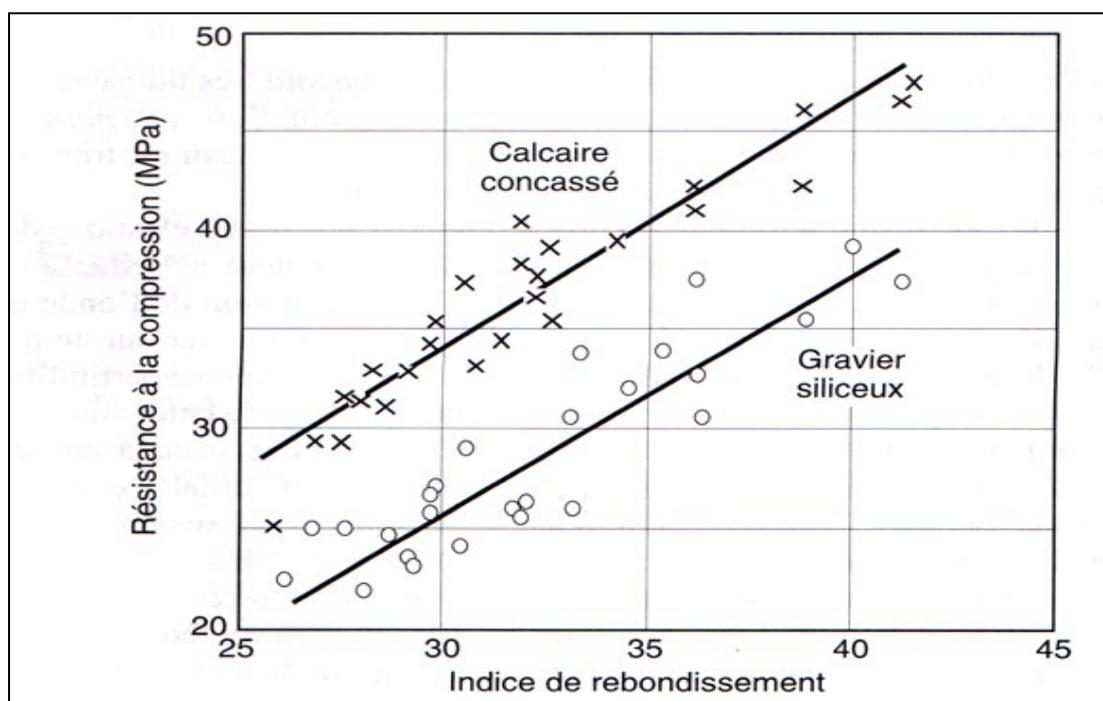


Figure (II.2) : La relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement pour des bétons confectionnés avec différents granulats (W.E Grieb (1958))

- La tête du marteau doit toujours être positionnée de façon perpendiculaire à la surface du béton, mais la position du marteau par rapport à la verticale aura effet sur l'indice de rebondissement en raison de la gravité qui agit sur le déplacement de la masse du marteau.
- L'indice de rebondissement doit être déterminé en plusieurs points rapprochés (en général de 6 à 12) pour une pièce bien déterminé en raison de la variabilité de la dureté du béton sur une petite surface, mais suivant la norme ASTM C 805-85 leur distance ne doit pas être inférieure à 25mm. La norme BS 1881 :partie202 :1986 recommande de faire l'essai en suivant le dessin d'une grille dont les points sont espacés de 20 à 50mm à l'intérieur d'une surface ne

dépassant pas 300*300mm ce qui permet de réduire la distorsion des données attribuables à l'opérateur.

II.2.1.3 Les étapes:

- 1- Après avoir déterminé l'indice de rebondissement en plusieurs points on calcul les indice moyens.
- 2- Procéder à une correction d'étalonnage.
- 3- Faire une correction à la position de scléromètre, montré sur la figure (II.3) et le tableau (II.1)

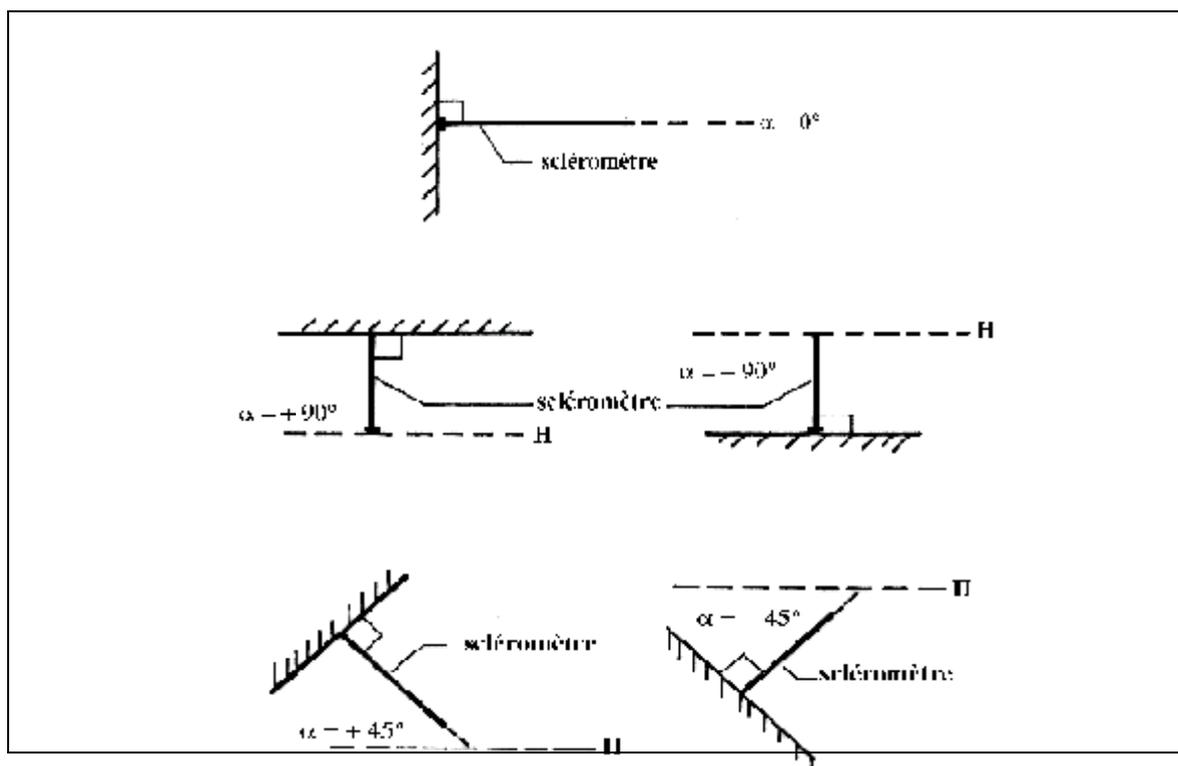


Figure (II.3): Elément à tester par le scléromètre

Tableau (II.1) : Correction de la valeur de l'indice de rebondissement en fonction de l'angle d'inclinaison

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

1- Correction de l'humidité du béton : Béton humide 1.10

Béton normal 1.00

Béton sec 0.95

- 2- Correction: résistance cubique/résistance cylindrique.
- 3- déterminé la résistance minimale et moyenne.

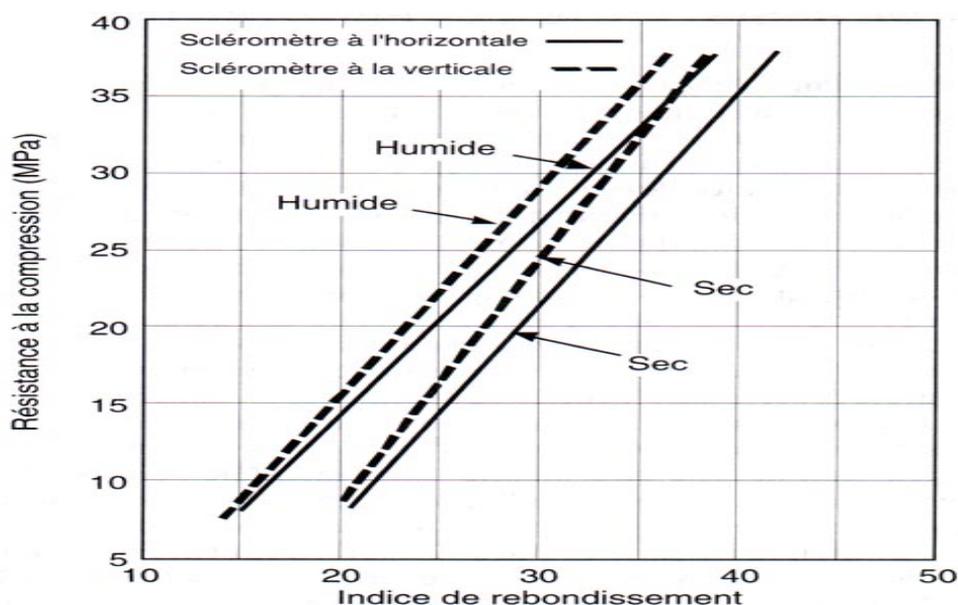
Nota : Dans le cas de béton plus de trois mois d'âge il est obligatoire de décaper d'une couche de 2cm du béton avant de faire les essais

II.2.1.4. Les avantages :

- C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide. Feldman (1977).
- L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués. (Neville 2000)
- L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service.
- Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé).
- Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface.

II.2.1.5 Les inconvénients

- Une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure et à des essais dans les conditions pour lesquelles les courbes d'étalonnage ont été établies. (Feldman 1977).
- Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats W.E.Grieb (1958) et le degré de carbonatation de la surface.
- La résistance obtenue n'est que celle de la peau de béton, elle ne renseigne pas sur le béton à l'intérieur de la masse de l'ouvrage. Selon la norme BS 1881 :partie202 :1986, l'épaisseur concernée par cet essai est d'environ 30mm. Les changements qui n'affectent que la surface du béton, comme la degré de saturation en surface (qui abaisse l'indice de rebondissement) C.H.Willetts (1958) figure (II.4) ou la carbonatation (qui augmente cet indice) S.Amasaki (1991) ont peu d'influence sur les propriétés du béton en profondeur.



Figure(II.4): La relation entre la résistance à la compression mesurée sur cylindre et l'indice de rebondissement d'un scléromètre utilisé à l'horizontale et à la verticale sur des surfaces de béton sèches et humides. C.H. Willetts (1958).

- On ne peut juger définitivement qu'une partie d'ouvrage à partir des indications du scléromètre.
- Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue en aucune façon une mesure de la résistance et l'on ne devrait pas accepter la revendication exagérée de son emploi en remplacement des résultats de l'essai de compression.

II.2.2. Essai d'auscultation dynamique :

Connu depuis longtemps cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation des impulsions ultrasoniques traversant le béton.

II.2.2.1. Principe :

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

Les principales caractéristiques de tous les appareils comprennent un générateur d'impulsions et un récepteur d'impulsions. Photos (II.2)

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables, elles sont utilisées dans le récepteur (Jons.R et Facoararu (1969)). La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.

Les normes ASTM C 97-83 (ré approuvée en 1991) et BS 1881 : partie 203 :1986 décrivent la méthode d'essai. En France, les normes P 18-414 de 1993 et P 18-418 de 1989 spécifient les méthodologies des différentes méthodes.

Les essais consistent à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés. Certains facteurs influent toutefois sur la prise de mesures :

- 1- Les ondes sonores 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 sonores selon Sturup, Vecchio et Caratin (1984).
- 2- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, 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.
- 3- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. Feldman (1977).
- 4- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse Bungey (1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

Photo (II.2) :
Appareil d'auscultation sonore
58-E48 avec oscilloscope



II.2.2 .2 La vitesse de propagation des ultrasons:

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

$$v^2 = \frac{E_d \cdot (1 - \nu)}{\rho(1 + \nu) \cdot \nu} \quad (\text{II.1})$$

Où

E_d est le module d'élasticité dynamique du béton

ρ est la masse volumique du béton

ν est le coefficient de poisson

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique et la résistance à la compression est affectée par un nombres de variables tel que l'age du béton, les condition d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions.

Ces facteurs représente un désavantage majeurs des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affecté par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnel , quand elle sera exécuté avec des essais de carottage.

Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un béton de bonne qualité. Leslie et Cheesman (1949) ont donné une relation générale entre la qualité du béton et la vitesse de diffusion des impulsions Cette relation est décrite au tableau (II.2)

Tableau (II.2): Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions selon Leslie et Cheesman (1949)

Qualité	Vitesse de propagation des impulsions, pi/s
Excellente	supérieure à 15 000
Bonne	12 000-15 000
Douteuse	10 000-12 000
Mauvaise	7 000-10 000
Très mauvaise	inférieure à 7 000

Beaucoup des interprétations des résultats de mesures aux ultrasons sont données dans la littérature. Par exemple 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

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

II.4.2.3. Manières de mesure :

La détermination de la vitesse de propagation des ultrasons se fait de trois manières, suivant le type de l'élément à tester :

a - Mesures En Transparence (Directe) :

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester. Comme la montre la figure (II.5)

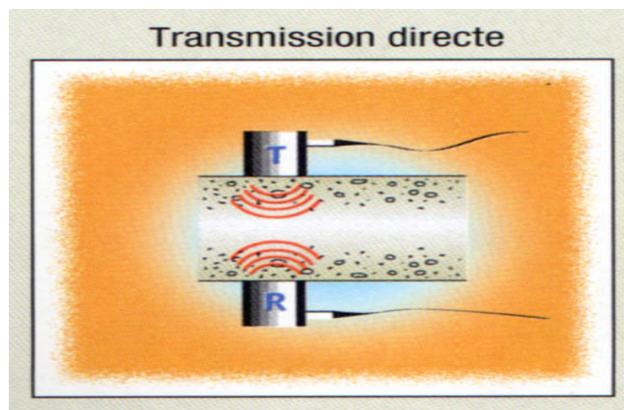


Figure (II.5) - Mesures en transparence (directe)

b - Mesures en surface (indirecte) :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur, montré sur la figure (II.6).

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.

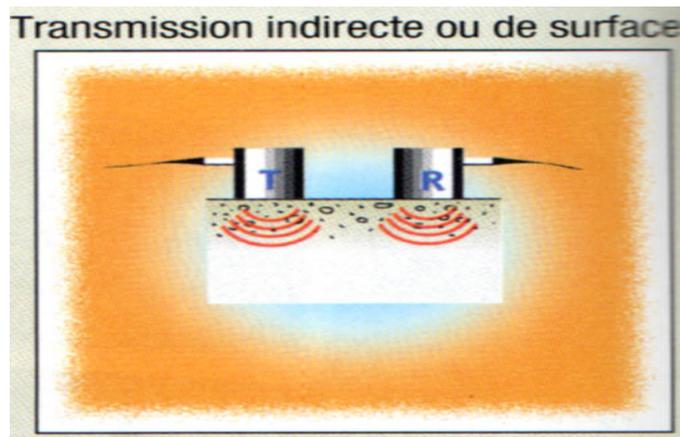


Figure (II.6) : Mesures en surface

c – Mesures semi directe :

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure ou on peut pas utiliser les deux autres manières.

Figure (II.7)

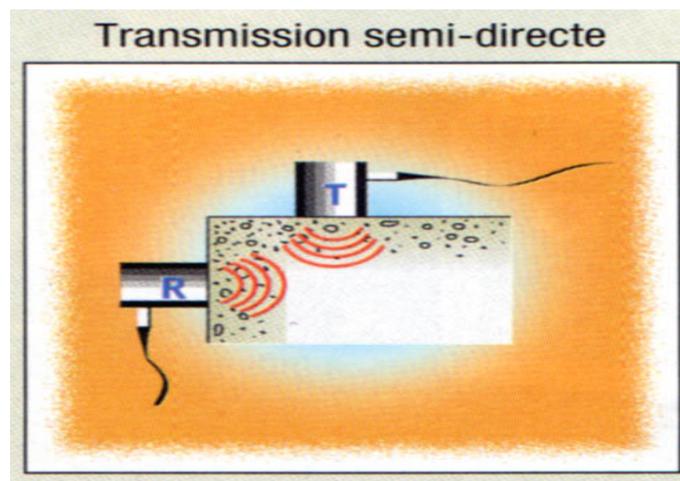


Figure (II.7) : Mesures semi directe

II.2.2.4 Les avantages :

- C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- L'essai peut être utilisé autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction.
- La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Selon Chung et Law (1983) l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides, les détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel/dégel.

- Elvery et Ibrahim (1976) et pendant leurs études sur la relation de la vitesse et la résistance dans plusieurs âges ont montrés que l'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage

II.2.2.5 Les inconvénients :

- Ces essais ne sont toutefois pas aussi efficaces pour évaluer la résistance à cause du grand nombre de variables influençant la relation entre la résistance et la vitesse de propagation des impulsions.
- La précision des résultats est fonction de la précision de l'étalonnage et de l'uniformité de la composition du béton de l'ouvrage et du béton des éprouvettes utilisées pour l'étalonnage.
- Dans l'essai de propagation des ultrasons la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance effective du béton.
- L'utilisation de cette méthode, si elle a bénéficié de grandes simplifications n'est donc justifiée que pour les personnes compétentes en matière d'appareillage et de connaissance du matériau de béton et aussi au courant des précautions à prendre.

II.2.3. Méthodes combinées :

II.2.3.1.1. Introduction

Il est possible de combiner deux ou plusieurs méthodes non destructives à la fois et dont les résultats, introduits dans un traitement unique garantissent au résultat final obtenu une précision supérieure. A titre d'exemple Mamillan et Bouineau (1980) on déduit de leur recherche sur ce sujet une méthode combinée qui permet une appréciation de la résistance de béton in situ en relation avec l'indice sclérométrique et la vitesse de son. Indépendamment du type d'essai non destructif utilisé, les données proportionnées et fiables de corrélation avec des données standard de la résistance à la compression en 28 jours sont habituellement nécessaires pour évaluer l'exactitude de la méthode non destructive. En outre, la corrélation avec des résistances à la compression en place employant des carottes de un ou deux endroits peut fournir des conseils en interprétant des résultats d'essai non destructifs; ceux-ci peuvent alors être employés pour examiner de plus grandes parties de la structure. Le soin devrait être pris pour considérer l'influence des tailles et des endroits variables des éléments structuraux

Cette solution est particulièrement avantageuse lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires. Par exemple, lorsqu'une augmentation du taux

d'humidité augmente la vitesse de son, mais diminue l'indice de rebondissement enregistré avec l'essai au scléromètre Bellander (1977) montré sur la figure (II.8). La RILEM (1993) propose des recommandations sur l'utilisation combinée d'essais non destructifs

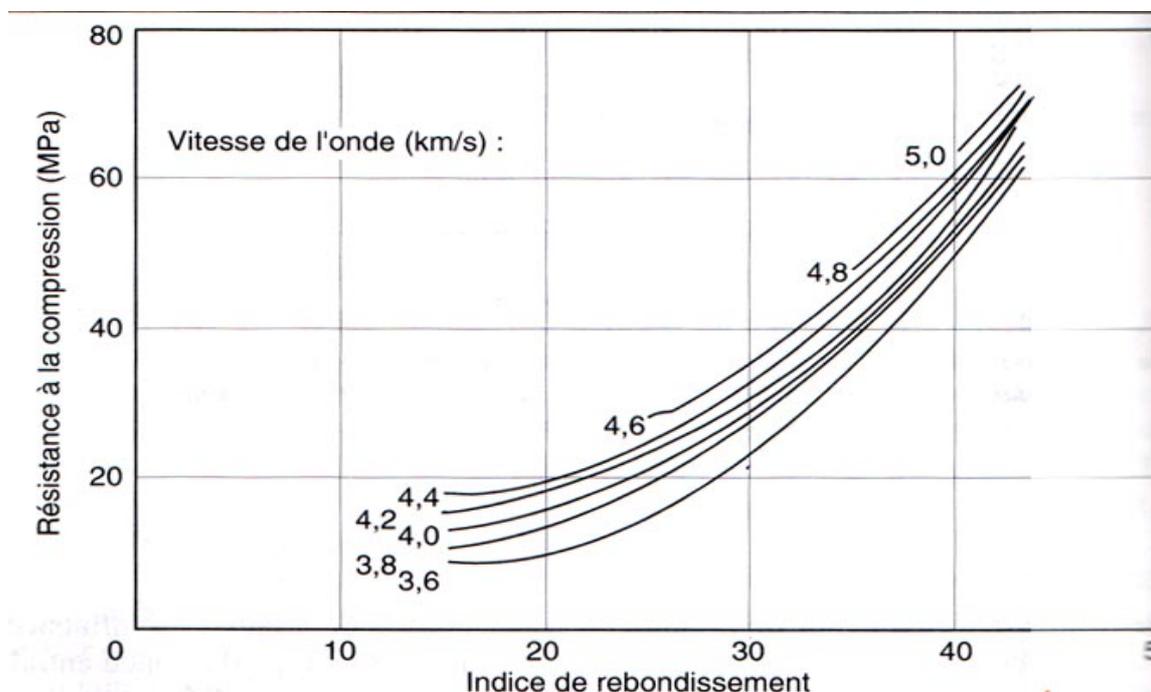


Figure (II.8): Courbe d'estimation de la résistance à la compression in situ par utilisation conjointe de la mesure de propagation d'ondes ultrasoniques et des résultats d'essai au scléromètre selon U. Bellander (1977)

II.2.3.2 Principe :

Dans notre étude on s'est basé sur la combinaison de deux essais non destructifs le plus largement répandus; essai de vitesse ultrason et l'essai de scléromètre. Le principe de cette méthode consiste à déterminer la résistance en compression du béton à partir des abaques donnant la variation de la résistance du béton en fonction de la vitesse des ultrasons et de l'indice de rebondissement $[R(V, N)]$. Cette résistance est corrigée par des valeurs des coefficients d'influences des différents constituants et de leur nature. Ou bien à partir des formules d'estimation d'après les résultats des essais en laboratoires.

Cette technique est utilisée pour la détermination de la résistance en compression en tenant compte à la fois vitesse de propagation de son et l'indice de rebondissement c'est la méthode combinée ; elle permet d'atteindre une précision accrue. Le principe reste identique et on a recours à un béton standard qui possède une courbe d'étalonnage spécifique.

La méthode a été développée pour essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.

II.2.3.3 Principe de développement de corrélation entre les paramètres de la résistance Et les résultats des essais non destructifs in-situ :

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasonique ou l'indice de rebondissement et la résistance à la compression est affectée par un nombres de variables tel que l'age du béton, les condition d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures. La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions. Ces facteurs représentent un désavantage majeur des essais non destructifs dans lequel la propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton. Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considérée, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes, mais peut être utilisée comme une technique additionnelle , quand elle sera exécutée avec des essais de carottage.

Aucun des essais mentionnés ci-dessus ne peut procure un excellent moyen pour établir et évaluer l'uniformité ou la qualité du béton, à moins que des corrélations au laboratoire soient établies entre les paramètres de la résistance et les résultats des essais non destructifs in situ.

La relation générale entre la résistance et l'indice sclérométrique est de la forme :

$$f_{cy} = A_0 + A_1 R^n \quad (\text{II.2})$$

Puisque le rapport $n=1$, la relation peut être considérée linéaire

$$f_{cy} = A_0 + A_1 R \quad (\text{II.3})$$

La relation générale entre la résistance et la vitesse de son est de la forme :

$$f_{cy} = A_2 V^B \quad (\text{II.4})$$

Ou $f_{cy} = a_1 e^{bV} \quad \dots(\text{II.5})$

f_{cy} = résistance à la compression de cylindre

R = l'indice sclérométrique

V = vitesse du son

A_0, A_1, A_2, B, a, b = Constantes

Samarin et Meynink (1981) ont trouvé que pour la majorité de béton commercialement utilisée en Australie la valeur de B peut être pris en tant que 4 que et l'équation de multi régression devient ainsi

$$f_{cy} = A_0 + A_1 R + A_2 V^4 \quad \dots(\text{II.6})$$

La deuxième variable (V^4) est transformée de sorte qu'une expression linéaire puisse être employée.

La corrélation est développée en utilisant des essais standard de résistance à la compression sur des éprouvettes examinés au laboratoire juste avant de les écraser.

1- L'équation pour le béton standard:

Un béton avec une proportion indiquée de mélange est défini en tant que béton standard, se rapportant à la méthode Roumaine pour l'essai non destructif combiné. L'expression suivante est appliquée par Tanigawa, Yamada, Baba et Kosaka(1982) pour estimer la résistance à la compression de mélange standard de béton :

$$f_c = k R + 22 V_{pc} - 94 \quad (\text{II.6})$$

k est le facteur de correction lié à l'âge du béton.

Le béton standard a été défini comme suit :

Type de ciment : ciment de Portland ordinaire

Dosage en ciment : 300 kg/m^3

Type d'agrégat : sable et gravier de fleuve

Taille maximum d'agrégat : 20 millimètres

Volume unitaire d'agrégat : 390 l/m^3

2- l'équation pour l'autre béton que le béton standard:

La résistance à la compression du béton avec d'autres proportions de mélange que celle de mélange standard de béton est estimée par l'équation suivante :

$$f_c = C(k R + 22 V_{pc} - 94) \quad (\text{II.7})$$

$$C = C_\phi \cdot C_v \cdot C_c \cdot C_k \quad (\text{II.8})$$

C : facteur total de correction lié aux proportions de mélange de béton

Avec :

C_c : facteur de correction lié au dosage en ciment

C_k : facteur de correction lié au du type de granulas

C_ϕ : facteur de correction lié à la taille maximum d'agrégat

C_v : facteur de correction lié au Volume unitaire d'agrégat

II.2.3.3. Les avantages

- L'utilisation combinée d'essais non destructifs garantit au résultat final obtenu une précision supérieure. Elle permet d'annuler des effets parasites. Par exemple lorsque des variations des propriétés du béton conduisent à des résultats contradictoires Bellander (1977)

- Cette technique est utilisée afin d'essayer d'augmenter la fiabilité des essais non destructifs en détectant la résistance du béton.
- Évaluer la qualité du béton in situ, avec un minimum de connaissance antérieure au sujet du béton examiné.

II.2.3.4. Les inconvénients :

- La technique ne peut pas être employée pour la détermination de la résistance de béton fabriqué par différents matériaux dont on ne connaît pas les proportions. La propriété du béton que l'on mesure est affectée par divers facteurs dont l'influence est différente de ce qu'elle est dans la résistance du béton.
- Cette technique pour l'estimation de la résistance du béton in situ n'est pas encore considéré, dans la pratique, comme un outil de remplacement au cylindre standard et aux cubes.

II.2.4 Essai par Carottage :

En vue d'effectuer des essais divers sur béton durci, le carottage par couronne diamantée procure un moyen intéressant d'investigation. Mais il est coûteux et souvent difficile à réaliser en raison de la proximité des armatures.

L'endroit carotté dépend du but de l'essai : on peut vouloir estimer la résistance d'une partie critique de la structure ou d'une partie que l'on présume endommagée par exemple par le gel. On peut également chercher à avoir une valeur représentative de la totalité de la structure, auquel cas les endroits à carotter sont choisis de façon aléatoire. Le carottage peut aussi être utilisé pour détecter de la ségrégation ou la présence de nids d'abeille, pour vérifier l'adhérence aux joints de construction ou pour vérifier l'épaisseur du revêtement.

Les carottes sont prélevées à l'aide d'un carottier à diamant on obtient ainsi une éprouvette cylindrique qui contient parfois des morceaux d'armature et dont les extrémités ne sont généralement ni planes ni d'équerre. Conformément aux normes BS 1881 : partie 120 :1983 et les normes ASTM C 42-90, la carotte devrait être placée dans l'eau, surfacée et mise à l'essai de compression à l'état humide, alors que la norme ACI 318-89 (révisée en 1992) spécifie des conditions d'humidité correspondant aux conditions en service. En France, les normes NF P 18 405 : 1970 la carotte devraient être enfermée après carottage dans un sac de polyane étanche.

Selon les études japonaises S.Yamane, et Al (1979), les essais effectués dans des conditions sèches donnent des valeurs de résistance généralement plus élevées de 10% par rapport à celles observées sur des carottes mises à l'essai à l'état humide.



Photo (II.3) : Carottage électrique à la couronne diamantée de 20 à 110 mm de diamètre

Équipement complet pour les prélèvements : carotteuse, scie diamantée

II.2.4.1. Facteurs Influençant La Résistance Des Carottes Mellas (2003)

Les résultats des essais dépendent de plusieurs facteurs. Ces facteurs ont une influence directe sur la qualité du béton. Les essais par carottage sont généralement utilisés pour la détermination des propriétés du béton in situ à un certain âge tel que la résistance et la porosité. Le carottage peut être utilisé pour détecter la ségrégation ou la présence de nids d'abeilles, pour vérifier l'adhérence aux joints de construction ou pour vérifier l'épaisseur de revêtement. Les résultats obtenus par cet essai ont besoin d'une interprétation minutieuse, car la résistance du béton d'où il est prélevé dépend de :

- ✓ La qualité du béton
- ✓ L'emplacement dans la structure
- ✓ Condition de cure
- ✓ La température sur site

L'estimation de la résistance à la compression peut être obtenue conformément aux normes BS 1881, partie 120, (1983) ou ASTM C42-90 ACI 318-89. Cette estimation dépend de :

- ✓ Du diamètre de la carotte
- ✓ du rapport hauteur/diamètre de la carotte
- ✓ De la direction de prélèvement
- ✓ De la présence des armatures

II.2.4.2. Diamètre

Le diamètre recommandé par BS 1881, partie 120, (1983) est de 100 mm ou 150 mm. Les carottes de petit diamètre sont généralement prévues pour donner des meilleurs résultats mais éparpillés. L'effet du diamètre sur la résistance a été rapporté dans le rapport N° 11 (Concrète

Society Technical Report 11 "CSTR 11"), Bellander (1976), Bungey (1979), Ramirez et Barcena (1979) et Keiller (1984). Les résultats obtenus par ces auteurs ont montré que la résistance n'est pas affectée par la taille des carottes avec de petits diamètres donnant des résultats variables pour un rapport hauteur/diamètre donné. Les recommandations spécifiant des carottes de diamètre des 100 mm ou 150 mm sont liées à la taille maximale des granulats utilisés. Le diamètre de la carotte doit être au moins trois fois la taille nominale des gros granulats [CSTR11, BS 1881 (1983)].

II.2.4.3 Elancement

En plus du diamètre de la carotte, la résistance estimée dépend, aussi, du rapport hauteur/diamètre appelé élancement. Les cylindres normalisés ont une hauteur égale à deux fois le diamètre mais on trouve dans des cas des carottes présentant d'autres proportions où cet élancement varie de 1 à 2. Le diamètre de la carotte dépend du carottier mais la hauteur dépend de la hauteur de la dalle ou de l'élément carotté. Manday et Ravinda (1984) rapporta que pour un élancement inférieur à 2 la résistance possède un taux croissant, tandis que pour un élancement entre 2 et 3 la résistance reste sensiblement constante; par contre pour un élancement au delà de 3 on remarque une nette réduction dans le taux de croissance. Plusieurs essais ont été élaborés par l'ASTM et le BS avec des élancement variant entre 1 et 2, en recommandant des coefficients de corrections. Meininger et al (1977) ont trouvé que ce facteur était le même pour des cylindre mis à l'essai à l'état humide ou sec mais plus faible que celui spécifié par la norme ASTM C 42-90. Des carottes dont l'élancement sont inférieures à 1 donne des résultats peu fiable. La norme BS 6089: 1981 exige une valeur minimale de 0.95 avant le surfacage, et selon BS 1881: partie 120, 1983, la coiffe ne doit pas excéder en aucun point 10 mm d'épaisseur.

II.2.4.4 Orientation de prélèvement

L'orientation de la carotte a un grand effet sur la résistance. Les carottes prélevées dans la direction verticale donne des résultats supérieurs à celles dans le sens horizontal. Graham (1969) rapporta que les carottes prélevées dans le sens horizontal ont une résistance inférieure de 8%. Les recommandations de CSTR11 BS 1881 (1983) distinguent les carottes horizontales des carottes verticales, le rapport des résistances des premières à celle des secondes étant de 0.92. L'effet de l'orientation du prélèvement des carottes rapportée par plusieurs auteurs a conduit aux recommandations du BS 1881 (1983), Cependant, Keiller (1984) rapporta que les carottes verticales donne des résistances sensiblement différentes à celles prélevées horizontalement.

II.2.4.5 Résistances

La résistance des carottes prélevée d'une structure finie est, aussi, affectée par la présence des armatures. Elle est affectée par la direction, la quantité, et la position des armatures dans la carotte.

Par ailleurs et pour ne pas aller plus loin dans les détail, il est convenable de connaître certaines définitions liée aux essais par carottage;

- a) Résistance standard : c'est la résistance d'un spécimen de forme cubique, curé et testé en concordance avec une méthode standard tel que BS 1881 (1983).
- b) Résistance actuelle : la résistance actuelle estimée et définie comme étant la résistance d'un échantillon de béton prélevé d'un élément et testé en accord avec les procédures décrites par CSTR11 et BS 1881 (1983).

$$\left[\begin{array}{l} \text{résistance} \\ \text{in situ} \\ \text{estimé} \end{array} \right] = \frac{D}{1.5 + 1/\lambda_c} \left[\begin{array}{l} \text{résistance à la} \\ \text{compression} \\ \text{de la carotte} \end{array} \right] \quad (\text{II.9})$$

Où:

D= 2.5 pour une carotte prélevée horizontalement

D= 2.3 " " " " verticalement

λ_c rapport de la longueur (après préparation)/ diamètre

Résistance potentielle

La résistance potentielle estimée est définie comme étant la résistance à la compression d'un béton frais, en accord avec la réglementation décrite au BS 1881 (1983). Le résultat est la valeur de la résistance estimée du béton d'un élément de structure exprimé en fonction de la résistance à la compression à 28 jours suivant les normes.

La résistance potentielle est donnée par la formule suivante :

Résistance potentielle = 1.3 x Résistance actuelle.

Cette formule est utilisée pour des prélèvement des carottes dans le sens horizontal comme dans le sens vertical [CSTR 11 (1976)]

II.3 Conclusion:

Dans l'état actuel les habitudes d'évaluation de la qualité du béton dans les domaines de la construction, consistent à faire des essais destructifs à la compression ou la traction sur des éprouvettes (cubiques ou cylindriques) confectionnées lors de la réalisation de l'élément structural ou sur des carottes prises directement de la structure. On a aussi recours à d'autres méthodes appelées essai non destructifs. Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas les constructions par exemple le marteau de Schmidt et des méthodes ultrasoniques de vitesse d'impulsion et d'autres qui n'ont pas été décrite dans notre mémoire :
Comme Essai de résistance à la pénétration, Essai d'arrachement , Essai de la fréquence de résonance, Essai pour la mesure de l'adhérence, et méthodes électriques ...etc.

Ainsi il y a un besoin énorme des outils efficaces de méthodes END d'évaluer les éléments en béton dans les structures. On le prévoit souvent dans ce point de technologie qu'un ingénieur devrait pouvoir faire quelques mesures sur le terrain rapides et pouvoir diagnostiquer l'état de la structure. Ceci peut être une réalité dans un proche avenir.