

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par : HARID HANA

SRAIDI SAMIRA

---

---

**Thème : Contrôle de la qualité du béton par des essais non destructifs**

**« Etude bibliographique »**

---

---

Sous la direction de : M<sup>me</sup> KHALDI NACERA

Juin 2016

---

---

## **Remerciements**

*Avant tout développement sur cette expérience, il apparait opportun de commencer nos remerciements par ALLAH qui par sa grâce et son infinie bonté nous a permis de réaliser ce présent travail.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude et nos remerciements à notre encadreur d'étude : Mme KHALDI NACERA pour son compréhension, son engagements, ses conseils qui étaient d'une aide inestimable, sa disponibilité et son soutien lors de l'élaboration du mémoire.*

*Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenue, de près ou de loin, pour la réalisation de ce travail*

*Nos profonds remerciements pour les membres de jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

*A l'issue de la rédaction de ce mémoire, nous sommes convaincus que le mémoire est loin d'être un travail solitaire. En effet, nous n'aurions jamais pu réaliser ce travail sans le soutien d'un grand nombre de personnes où leur générosité et leur coup de main ont donné un souffle de vie pour la naissance et la capacité de réaliser ce modeste travail.*

## *Dédicaces*

*À ma chère mère*

*ma raison d'être, ma raison de vivre, la lanterne  
qui éclaire mon chemin.*

*À mon cher père*

*en signe d'amour, de reconnaissance et de  
gratitude pour tous les soutiens et les sacrifices  
dont il a fait preuve à mon égard.*

*À mes chers frères : kassim et soufian*

*À ma chère sœur : loubna*

*À mon encadreur Mme khalidi Nacera*

*À tous mes amies : samira, soumia, amira et  
mouna*

*En témoignage de l'amitié sincère et du soutien  
inébranlable que vous m'avez apporté.*

*Je dédie ce travail.*

*Hana*

## Dédicace

Tout d'abord, je tiens à remercier Allah, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Avec joie, fierté et respect, Je dédie ce mémoire :

À ma plus chère mère qui m'a soutenu et encouragé durant toute ma vie.

À mon père

À ma petite chère sœur : Selma et à mon petit frère : Yacine

À mon cher mari : Fethi Aouaichia

À mes tantes et mes oncles

À mes cousins et mes cousines

À toute les familles : sraidi ; atailia, aouaichia

À ma binôme : Hana

À tous ma promotion de Génie Civil 2015/2016

À tous mes enseignants qui ont contribué à ma formation.

Enfin, nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin nous ont apporté aide et encouragement. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

إن الذين نحبهم ونعزهم مكانتهم ليست بين الأسطر والصفحات، لأن مقامهم أجلى وأعلى فالقلب سكناهم والذكرى ذكراهم،  
والقلب لن ينساهم.

**Samira**

## **Résumé**

Dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction, comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens, il est important de mettre en œuvre des techniques performantes et adaptées à ce contrôle. Pour cela, les essais non destructifs ont pour objectif de qualifier, sans destruction et en respectant son intégrité. Ces essais sont très pratiques, rapides et avec un coût raisonnable et légers à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage,

Dans cette étude bibliographique nous avons essayé de comprendre les différentes corrélations existantes entre les essais destructifs et les essais non destructifs et savoir si on peut remplacer les méthodes destructives par les méthodes non destructives car pour la plupart, les méthodes non destructives sont des méthodes comparatives, par conséquent l'interprétation des résultats des essais non destructifs doit se faire d'une manière très judicieuse.

**Mots clés** : béton, corrélation, essais destructifs et non destructifs, contrôle.

## ملخص

في اطار مراقبة البنايات الجديدة او البنايات في طور الانجاز او لتشخيص حالة المباني القديمة, من المهم وضع آليات و طرق ناجحة لوقاية الهيكل لهذا يتم استخدام الاختبارات غير المتلفة التي تهدف إلى التأهل دون تدمير الخرسانة والحفاظ على سلامتها. هذه التجارب مريحة جدا, سريعة و بتكلفة معقولة و سهلة التنفيذ و تعطي معلومات شاملة على البنايات.

من خلال هذه الدراسة حاولنا فهم العلاقات المتبادلة بين مختلف التجارب المدمرة والتجارب الغير مدمرة وإذا كان يمكن أن تحل الطرق الغير مدمرة محل الطرق المدمرة لان الكثير يعتبر ان, الطرق الغير مدمرة هي طرق مقارنة , لذا يجب أن يكون تفسير نتائج الاختبار الغير مدمرة على نحو سليم و دقيق

الكلمات المفتاحية

خرسانة – ارتباط – تجربة مخربة و غير مخربة – مراقبة.

## **Abstract**

As part of new structures or building controls, as of works old state diagnostics, it is important to implement efficient and adapted to this control techniques. For this, the NDT aim to qualify without destruction and respecting its integrity. These tests are very convenient, fast and at a reasonable cost and light to implement and give added a comprehensive response to the scale of a structure or structures,

In this literature review we tried to understand the different correlations between destructive testing and non-destructive testing and whether we can replace destructive methods by non-destructive methods for mostly non-destructive methods are comparative methods, therefore the interpretation of non-destructive test results should be a very meaningful way.

**Keywords:** concrete, correlation, destructive and non destructive tests, control.

# *Sommaire*

Remerciements

Dédicace

Résumé

الملخص

Abstract

Listes des figures

Liste des tableaux

Introduction

Objectif

<b>Titres</b>	<b>Pages</b>
<b>Chapitre I : NOTIONS GENERALES</b>	
1. Béton.	3
1.1. définition du béton.	3
1.2. Résistance caractéristique du béton.	3
1.2.1. Résistance en compression.	3
• Relation entre la résistance et le module élastique.	3
➤ Déformations instantanées ( $E_{ij}$ ).	3
➤ Déformations différées ( $E_{vj}$ ).	4
• Paramètres influant la résistance.	4
1.2.2. Résistance à la traction.	4
1.3. Propriétés du béton.	4
1.3.1. Béton frais.	5
1.3.2. Béton durci.	6
2. Le contrôle non destructif (CND).	6
2.1. Historique.	7
2.2. Domaines d'utilisation.	7
2.3. Différentes méthodes de contrôles.	8
3. Le contrôle destructif.	10
3.1. Limite des méthodes destructives.	10



## Chapitre II : Les méthodes de contrôles de béton

II.A. Contrôles par les méthodes non destructives.	11
1. Scléromètre.	11
1.1. Objectif de l'essai.	11
1.2. Principe de l'essai.	11
1.3. Appareillage.	12
1.4. Mode Opérateur.	12
1.4.1. Préparation de la surface	12
1.4.2. Points de mesures	13
1.5. Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement	13
1.6. Inconvénients de la méthode sclérométrique	14
1.7. Références normatives	14
1.8. Les avantages de la méthode sclérométrique	14
2. Méthode d'auscultation dynamique	14
2.1. Objectif	14
2.2. Principe	15
2.3. Mode Opérateur	16
2.3.1. Travaux préparatoires	16
2.3.2. Points de mesures	17
2.4. Distances minimales entre points de mesures	17
2.5. Étalonnage de l'appareil	17
2.6. Manières de mesure	17
2.6.1. Mesure en transparence (directe)	17
2.6.2. Mesures en surface (indirecte)	18
2.6.3. Mesures semi directe	18
2.7. Interprétation des résultats de mesure aux ultrasons	18
2.7.1. Paramètres influant la vitesse des ultrasons	19
2.7.2. Autres interprétations possibles	19
2.8. Références normatives	20
2.9. Les avantages	20
3. La Maturométrie	21
3.1. Fondements de la méthode.	21
3.2. Méthode d'essai	21

3.3. Chaîne de mesure	22
3.4. Avantages de la maturométrie	22
4. Contrôle radiographique	23
4.1. Principes fondamentaux	24
4.2. Equipements de la méthode d'essai radiographique	25
4.3. Applications et limites	25
5. Thermographie infrarouge	26
5.1. Principes fondamentaux	26
5.2. Equipements utilisés dans la thermographie infrarouge	28
6. Le Géo radar	28
6.1. Le matériel	28
6.2. Application aux bâtiments et ouvrages d'art	29
7. Impact-écho	30
7.1. Principe de base	30
7.2. Analyse des données	30
7.3. Le temps de contact	31
8. Acoustique non linéaire : le saut temporel	32
II.B. Contrôles par les méthodes destructives	33
1. Essai de traction par fendage	33
1.1. Objet de la norme	33
1.2. Eprouvettes	33
1.3. Machine d'essai	34
1.4. Bandes de chargement	34
1.5. Opérations préparatoires	34
1.5.1. Précautions contre la dessiccation	34
1.5.2. Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de sa masse volumique	35
1.5.3. Choix des génératrices de chargement	35
1.6. Conduite de l'essai	35
1.6.1. Mise en place et centrage de l'éprouvette	35
1.6.2. Mise en charge	36
1.6.3. Expression des résultats	36
2. Essai de traction directe	36

2.1. Objet de la norme	36
2.2. Eprouvettes	36
2.3. Machine d'essai	37
2.4. Dispositifs de traction	37
2.5. Opérations préparatoires	37
2.5.1. Précautions contre la dessiccation	37
2.5.2. Sciage des extrémités de l'éprouvette	39
2.5.3. Contrôle des faces de chargement	39
2.5.4. Détermination de la masse volumique	39
2.5.5. Collage des faces de chargement aux plaques de traction	39
2.5.6. Conduite de l'essai	40
3. Essais de traction par flexion	40
3.1. Objet de la norme	40
3.2. Résistance à la traction par flexion	41
3.3. Eprouvette	41
3.4. Machine d'essai	41
3.5. Appareil de chargement	42
3.6. Opérations préparatoires	42
3.6.1. Précautions contre la dessiccation	42
3.6.2. Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de sa masse volumique	43
3.6.3. Contrôle des tolérances de formes de l'éprouvette	43
3.6.4. Conduite de l'essai	43
3.6.5. Expression des résultats	44
4. Essais de compression	44
4.1. Objet de la norme	44
4.2. Définition de la résistance à la compression	44
4.3. Eprouvettes	45
4.4. Machine d'essai	45
4.5. Opérations préparatoires	45
4.5.1. Précautions contre la dessiccation	45
4.5.2. Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de la masse volumique	47

4.5.3. Surfaçage des extrémités	47
4.5.4. Conduite de l'essai	47
4.5.5. Expression des résultats	48

### **Chapitre 3 : Présentation des travaux antérieurs**

III Présentation des résultats de quelques travaux antérieurs	49
III.1 Corrélations entre essais non destructifs et essais destructifs du béton à faible résistance mécanique	49
III.2 Le contrôle non destructif des ouvrages en béton « évaluation de la résistance du béton à la compression sur site : application de la méthode combinée »	53
III.3 Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre et Ultrason)	57
III.4 Travaux réalisés au sein de l'université de Guelma	61
III.4.1 Caractérisation de l'adhérence des mortiers avec différents supports	61
III.4.2 Contrôle du béton par des essais non destructifs	63
III.4.3 Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre : influence de la composition	66
III.5 Travaux réalisés au sein de l'université de Constantine	68
III .5.1 Bases expérimentales pour l'établissement d'une corrélation entre les essais destructif et non destructif « cas d'un béton ordinaire »	68
III.5.2 Bases expérimentales pour l'établissement d'une corrélation entre les essais destructifs et non destructifs : cas du béton autoplacant	71
III.6 Travaux réalisés au sein de l'université d'Annaba	72
III.6.1 L'utilisation de la Technique Ultrasonique dans le cas de Béton Recyclé	72
III.6.2 Détection du degré d'endommagement du béton par ultrason	76
III.6.3 La mesure de la résistance du béton a la traction	78

### **Chapitre IV : conclusions**

Conclusions	81
<b>Conclusion générale</b>	<b>83</b>

# Liste des figures

Titres	Pages
<b>Figure I.1</b> : test du cône d'Abrams.	5
<b>Figure II. 1</b> : scléromètre ou marteau de Schmidt.	12
<b>Figure II.2:</b> Grille de mesure sur ouvrage.	13
<b>Figure II.3</b> : Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter.	13
<b>Figure II.4</b> : appareil à ultrason.	15
<b>Figure II.5</b> : Mesures en transparence (directe).	17
<b>Figure II.6:</b> Mesures en surface.	18
<b>Figure II.7:</b> Mesures semi directe.	18
<b>Figure II.8:</b> Courbe RILEM.	20
<b>Figure II.9</b> : schématisation du principe de la méthode maturométrique.	22
<b>Figure II.10</b> : Appareil de mesure.	23
<b>Figure II.11</b> : principe de la radiographie .	24
<b>Figure II.12</b> : mesures par la thermographie infrarouge.	26
<b>Figure II.13</b> : Appareil de mesure	26
<b>Figure II.14</b> : effet d'un vide sur la propagation de la chaleur d'une dalle en béton .	27
<b>Figure II.15</b> : Un système géoradar portatif comportant une antenne centrée sur 400 MHz.	29
<b>Figure II.16</b> : Un système géoradar spécial pour les surfaces réduites.	29
<b>Figure II.17:</b> Vue schématique de la méthode Impact-Écho.	31
<b>Figure II.18</b> : Configuration de test non linéaire : saut temporel.	32
<b>FigureII.19</b> : essai de fendage	33
<b>FigureII.20</b> : Essai de flexion	41
<b>Figure II.21</b> : portiques pour essais de flexion	41
<b>Figure II.22</b> : Machine d'essais de compression	45
<b>Figure III .1</b> : Comparaison entre les deux courbes de corrélations développées sur éléments et sur éprouvettes	50
<b>Figure III.2</b> : Comparaison entre les deux courbes de corrélations développées sur élément et sur éprouvette	51
<b>Figure III. 3</b> : Courbes de corrélation combinée entre résistance par écrasement des spécimens conservés dans l'eau et mesures non destructives sur élément d'ouvrage	52

<b>Figure III. 4 :</b> Comparaison entre la résistance observée par écrasement et celles estimées par différents modèles combinés établis par plusieurs auteurs	53
<b>Figure III.5 :</b> Corrélation entre indice sclérométrique et résistance en compression pour éprouvettes.	54
<b>Figure III.6 :</b> Corrélation entre vitesse ultrasonique et résistance en compression pour éprouvettes.	54
<b>Figure III.7:</b> Corrélation entre vitesse ultrasonique, indice sclérométrique et résistance en compression pour éprouvettes.	55
<b>Figure III.8 :</b> Corrélation entre indice scléromètre et résistance compression carottes	55
<b>Figure III.9:</b> Corrélation entre vitesse ultrasonore et résistance compression carotte	56
<b>Figure III.10:</b> Corrélation entre vitesse ultrasonique, indice scléromètre et résistance de compression carotte	56
<b>Figure III.11 :</b> Corrélation Résistance à la compression – Indice de rebondissement.	57
<b>Figure III.12 :</b> Corrélation Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique.	58
<b>Figure III.13 :</b> Corrélation combinée entre la résistance à la compression par écrasement et les mesures non destructives (Indice sclérométrique et Vitesse ultrasonique).	59
<b>Figure III.14 :</b> Corrélations Résistance à la compression – Indice de rebondissement établies par divers auteurs.	60
<b>Figure III.15</b> Corrélations Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique établies par divers auteurs.	60
<b>Figure III.16 :</b> Comparaison entre la résistance par écrasement et celles estimées par différents modèles combinés établis par divers auteurs.	60
<b>Figure III.17 :</b> Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les bordures de trottoir revêtues par le mortier de ciment (ép. 1 cm et 2 cm).	61
<b>Figure III.18:</b> Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les poutrelles revêtues par le mortier de ciment (ép. 1 cm et 2 cm).	61
<b>Figure III.19 :</b> Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les parpaings revêtus par le mortier de ciment (ép. 1 cm et 2 cm).	62
<b>Figure III.20:</b> Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les bordures de trottoir revêtues par le mortier prêt à l'emploi (ép. 1 cm et 2 cm).	62
<b>Figure III.21:</b> Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les poutrelles revêtues par le mortier prêt à l'emploi (ép. 1 cm et 2 cm).	62

<b>Figure III.22:</b> Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les parpaings revêtus par le mortier prêt à l'emploi (ép. 1 cm et 2 cm).	63
<b>Figure III.23 :</b> Resistances des bétons à 7 jours	66
<b>Figure III.24 :</b> Resistances des bétons à 14 jours	66
<b>Figure III.25 :</b> Resistances des bétons à 28 jours	67
<b>Figure III.26 :</b> Relations entre les résistances par scléromètre et par écrasement.	67
<b>Figure III.27 :</b> les résultats des éprouvettes (BO30) obtenus à partir d'essai destructifs et non destructifs.	68
<b>Figure III.28 :</b> les résultats des éprouvettes (BO50) obtenus à partir d'essai destructifs et non destructifs.	68
<b>Figure III.29 :</b> Charge de rupture des poutres en (BO30) et(BO50).	69
<b>Figure III.30:</b> résultats d'essai non destructif par rapport aux destructif (BO30).	70
<b>Figure III.31 :</b> résultats d'essai non destructif par rapport aux destructif (BO50).	70
<b>Figure III.32:</b> comparaison entre les résultats de l'essai de compressions et les essais ND mélange N° 01.	71
<b>Figure III.33 :</b> comparaison entre les résultats de l'essai de compressions et les essais ND mélange N° 02.	71
<b>Figure III.34 :</b> Courbe de vitesse du son et de Résistance (dosage 350)	74
<b>Figure III.35:</b> Courbe de vitesse du son et de Résistance (dosage 400)	75
<b>Figure III.36:</b> La variation de la vitesse ultrasonique	75
<b>Figure III.37 :</b> comparaison entre la résistance réelle et destructive	77
<b>Figure III.38:</b> comparaison entre la résistance mesurée par la méthode non destructive et par la méthode destructive sur toutes les éprouvettes.	79

# Liste des tableaux

Titres	Pages
<b>Tableau I.1</b> : vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton	6
<b>Tableau II.1</b> : Moyens de mesure selon type de recul au scléromètre	12
<b>Tableau III.1</b> : Résultats des régressions pour éprouvettes.	55
<b>Tableau III.2</b> : Résultats des régressions – carotte	56
<b>Tableaux III.3</b> : variation de la résistance (MPa) en fonction de l'âge du béton selon les différentes méthodes utilisées	63
<b>Tableau III.4</b> : Calcul de la vitesse de son de dosage 350 Kg/m <sup>3</sup>	73
<b>Tableau III.5</b> : Calcul de la vitesse de son de dosage 400 Kg/m <sup>3</sup>	73
<b>Tableau III.6</b> : La Résistance moyenne pour chaque mélange	74
<b>Tableau III.7</b> : comparaison entre la résistance non destructive et la résistance réelle par ultrason et destructive par essai de compression.	76
<b>Tableau III.8</b> : résistance caractéristique du béton et écart type.	77
<b>Tableau III.9</b> : résultats de mesure de la résistance à la compression mesurée par la méthode non destructive et par l'écrasement.	78
<b>Tableau III.10</b> : Moyenne mesurée par les 2 méthodes, Ecart-type et coefficient de variation	79



## **I. INTRODUCTION :**

Le béton est un matériau de construction qui trouve son champ d'utilisation pratiquement, dans tous les domaines de génie civil pour les avantages économiques et techniques qu'ils présentent mais d'une manière générale les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages, notamment lors de la confection du béton et lors de sa mise en œuvre.

Les méthodes habituelles d'évaluation de la qualité du béton, dans le domaine de la construction sont celles relatives aux essais destructifs à la compression et à la traction effectués sur des éprouvettes prélevées lors de la réalisation de l'ouvrage.

Mais lors de la mise en œuvre, plusieurs paramètres liés à la qualité sont concernés en raison du non respect des règles élémentaire de mise en œuvre.

Et par conséquent des doutes sont émis sur la qualité des bétons (mise en œuvre).

Ces doutes mèneront vers un contrôle sur les ouvrages réalisés.

Plusieurs méthodes de contrôle de qualité peuvent être envisagées, les plus couramment utilisées sont :

- Les méthodes destructives
- Les méthodes non destructives

## **II. OBJECTIF :**

L'objectif principal de ce travail est de comparer les deux méthodes utilisées dans le contrôle de la qualité de béton et savoir si on peut remplacer les méthodes destructives par les méthodes non destructives car pour la plupart, les méthodes non destructives sont des méthodes comparatives, par conséquent l'interprétation des résultats des essais non destructifs doit se faire d'une manière très judicieuse.

### **III. PRESENTATION DE L'ETUDE :**

Ce travail se compose de quatre chapitres :

- ❖ **Chapitre I** : Notions générales.
- ❖ **Chapitre II** : Les méthodes de contrôle du béton.
- ❖ **Chapitre III**: Présentation des résultats antérieurs.
- ❖ **Chapitre IV** : conclusions.
- ❖ Conclusion générale.

## NOTIONS GENERALES

### 1 Béton :

#### 1.1 définition du béton :

Le béton est un matériau composite. Il est constitué de plusieurs matériaux différents, qui deviennent homogènes entre eux, soit à la mise en œuvre (béton frais), soit après durcissement (béton durci). Ses composants sont déterminés dans des proportions étudiées afin d'obtenir des propriétés souhaitées telles que la résistance mécanique, la consistance, la durabilité, l'aspect architectural (formes, teintes, textures), la résistance au feu, l'isolation thermique et phonique, et ceci en utilisant des méthodes spécialisées dites « méthodes de formulation du béton ». [B.B]

Le béton est un matériau composite constitué de granulats gros et fins (gravier ou pierre concassée, sable), de ciment et d'eau. [NET1]

#### 1.2. Résistance caractéristique du béton :

##### 1.2.1. Résistance en compression :

Dans les cas courants, un béton est défini par la valeur de sa résistance à la compression à l'âge de 28 jours, dite valeur caractéristique requise (ou spécifique), celle-ci, notée, est mesurée sur des éprouvettes cylindriques ayant un diamètre de 16cm et une hauteur de 32cm, écrasée en compression centrée. On peut admettre la résistance à l'âge (j) jours notée  $f_{cj}$  avec les formules suivantes :

$$f_{cj} = \frac{j \cdot f_{c28}}{4,76 + 0,83 \cdot j} \dots \dots \dots \text{Pour } f_{c28} \leq 40 \text{MPa} \dots \dots \dots (1).$$

$$f_{cj} = \frac{j \cdot f_{c28}}{1,40 + 0,95 \cdot j} \dots \dots \dots \text{Pour } f_{c28} \geq 40 \text{MPa} \dots \dots \dots (2).$$

- **Relation entre la résistance et le module élastique :**

- **Déformations instantanées ( $E_{ij}$ ) :**

Sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 heures, on admet à défaut de mesures, qu'à l'âge de j jours, le module de déformation longitudinale instantanée du béton (différées >24 h)  $E_{ij}$  est égal à :

$f_{cj}$  : la résistance caractéristique à la compression à  $j$  jours en « MPa ».

➤ **Déformations différées ( $E_{vj}$ ) :**

Pour des charges de longue durée d'application, le module de déformation longitudinale différée du béton à  $j$  jours est donné par :

$$E_{vj} = 3700 (f_{cj})^{1/3} \quad \text{ou} \quad E_{vj} = E_i j/3$$

• **Paramètres influant la résistance [CH.Y] [N.Z]**

En pratique, on lie souvent la résistance ultime du béton en compression, qui apparaît comme facteur essentiel dans la conception des ouvrages ; au rapport (eau/ciment). Cependant à côté de ce facteur, d'autres paramètres jouent également un rôle très important sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques du béton. Parmi ces paramètres, on peut citer :

- ✓ L'âge du béton ;
- ✓ La nature et le dosage en ciment ;
- ✓ La nature minéralogique des granulats ;
- ✓ L'adhérence de la pâte aux granulats (interface (ciment/granat)) ;
- ✓ Le dosage en eau ;
- ✓ La température ;
- ✓ L'humidité ;
- ✓ Les conditions de mise en œuvre et la qualité du contrôle sur chantier ;

**1.2.2. Résistance à la traction :**

La résistance caractéristique à la traction du béton à  $j$  jour notée  $f_{tj}$ , est conventionnellement définie par la relation :  $f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{cj}$ .

Dans laquelle  $f_{tj}$  et  $f_{cj}$  sont exprimées en MPa (ou N/mm<sup>2</sup>).

Cette formule est valable pour les valeurs de  $f_{cj} < 60$  MPa.

**1.3. Propriétés du béton : [NET 2]**

**Moulable**, c'est-à-dire qu'on peut lui faire prendre facilement des formes volumiques assez simples, une grande variété des formes qu'il peut épouser c'est la Maniabilité.

**Durcie**, avec le temps le béton devient un matériau d'ur et relativement indéformable c'est-à-dire mécaniquement résistant.

**Compacité**, La résistance à la compression d'un béton contenant suffisamment de liant croit

Avec sa compacité.

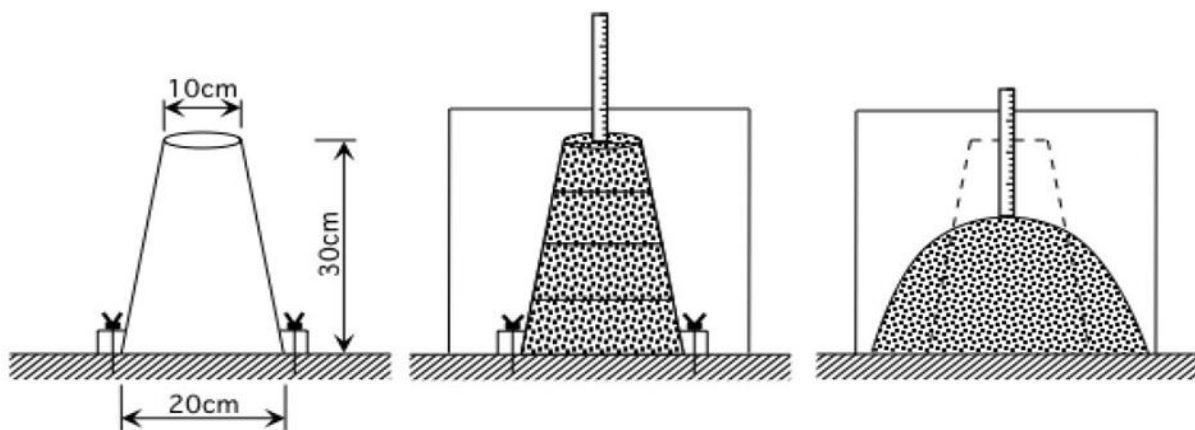
Maniabilité et résistance mécaniques sont deux (02) notions contraires :

- Eau en excès bonne maniabilité, mauvaise résistance.
- Granulat roulé bonne maniabilité, mauvaise résistance.
- Granulats concassés mauvaise maniabilité, bonne résistance.

Pour réaliser un béton qui répond aux deux critères, il faut optimiser tous les facteurs

### 1.3.1 Béton frais :

**Ouvrabilité (ou maniabilité)**: qualité du béton; qui se traduit par la capacité du béton de bien remplir tous l'espace du coffrage et d'assurer un bon enrobage des armatures. L'ouvrabilité d'un béton est couramment appréciée par le test du cône d'Abrams, ou le béton est mis dans un moule conique, l'affaissement du béton une fois le moule enlever donne une appréciation sur sa maniabilité. La mise en place du béton dans le moule se fait en 4 couches d'épaisseurs égales, piquer à l'aide d'une tige à raison de 25 coups pour chaque couche. Le cône est ensuite enlevé doucement sans secousses.



**Figure I.1** : Test du cône d'Abrams

En fonction de l'affaissement mesuré, la maniabilité du béton est appréciée et une manière de sa mise en œuvre est recommandée.

**Tableau I.1** : Vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton. [NET 2]

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

### 1.3.2 Béton durci : [NET 2]

Résistance mécanique : La résistance mécanique la plus importante pour le béton étant la résistance à la compression, elle est couramment mesurée sur des éprouvettes cylindriques 16x32cm (16cm de diamètre et 32cm de hauteur)

Le béton a plusieurs inconvénients tels que : Temps de durcissement relativement long, une exécution peu précise et difficulté de reprise des ouvrages en cas de transformations.

Le Béton de ciment présente une excellente résistance à la compression, mais une faible résistance à la traction, et aussi à la flexion a peu près 1/10 de sa valeur de compression.

## 2. Le contrôle non destructif (CND) : [NET 3]

Est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi des essais non destructifs (END) ou d'examen non destructifs

L'objectif principal des méthodes non destructives appliquées au béton est de fournir une évaluation correcte de la qualité du matériau dans sa structure même, quels que soient son âge et son état de dégradation, sans avoir à s'en rapporter uniquement aux résultats d'éprouvettes qui ne représentent pas forcément la structure exacte du béton d'ouvrage

**2.1 Historique : [NET 4]**

L'essai non destructif (END) du béton est de grande importance scientifique et pratique. Le sujet a suscité l'attention croissante pendant des années récentes, particulièrement le besoin de caractérisation de qualité des constructions endommagées faites en béton, en utilisant des méthodes non destructives.

Williams en (1936) a lancé le premier essai non destructif, après cela et pendant le développement de domaine de construction, une gamme d'essais non destructifs in-situ, a été développée, par plusieurs chercheurs dans ce domaine : Ernest Schmilt (1948), Jones (1962), Whitehurst (1966), Malhotra (1976) a présenté une enquête complète de littérature pour les méthodes non destructives normalement utilisées pour l'essai et l'évaluation du béton, Bungey (1982). Au milieu des années soixante Skramtaev et Leshchinsky (1966) ont proposés pour la première fois l'utilisation de deux méthodes non destructives ensembles, et le travail le plus fondamental de ce sujet a été présenté par facaoaru (1969).

En (1991) Leshchinsky a récapitulé les avantages des essais non destructifs comme réduction de la consommation de travail de l'essai, une diminution de la consommation de travail des travaux préparatoires, un peu de dommages structuraux, une possibilité d'examiner la résistance des structures sans les endommager avec application de moins d'équipement d'essai cher, par rapport à l'essai destructif. Ces avantages sont sans valeur si les résultats ne sont pas fiables, représentatifs, et aussi étroitement comme possible à la résistance réelle de la partie examinée de la structure.

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

**2.2. Domaines d'utilisation : [NET 3]**

Ces méthodes sont utilisées dans l'ensemble des secteurs industriels. On peut citer notamment :

- l'industrie pétrolière (pipelines, tubes, barres, soudures, réservoirs) ;
- l'industrie navale (contrôle des coques) ;
- l'aéronautique (poutres, ailes d'avion, nombreuses pièces moteurs, trains d'atterrissage, etc.) ;
- l'aérospatiale et l'armée ;

- l'industrie automobile (contrôle des blocs moteurs) ;
- la sidérurgie
- la chaudronnerie et la tuyauterie en fabrication
- l'industrie de l'énergie : réacteurs nucléaires, chaudières, tuyauterie, turbines, etc. (maintenance des installations) ;
- le ferroviaire en fabrication et en maintenance notamment pour les organes de sécurité (essieux, roues, bogies);
- l'inspection alimentaire ;
- le Génie Civil et le bâtiment ;

Et en règle générale dans tous les secteurs produisant :

- des pièces à coût de production élevé en quantité faible (nucléaire, pétrochimique, par exemple) ;
- des pièces dont la fiabilité de fonctionnement est critique (BTP, nucléaire, canalisation de gaz, par exemple).

Mais également dans des secteurs moins industriels comme l'archéologie !

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

Les essais non destructifs permettent de contrôler la qualité de la construction et mesurer de façon indirecte les caractéristiques des matériaux à savoir :

- La résistance
- L'homogénéité
- La porosité
- La durabilité ...

### **2.3. Différentes méthodes de contrôles : [NET 3]**

Les normes NF EN ISO 9712 Août 2012 (qui annule et remplace la norme EN 473) et EN 4179 définissent un certain nombre de symboles pour les méthodes usuelles. Ces symboles correspondent généralement à l'abréviation de la désignation anglaise de la méthode, par exemple, le symbole PT pour le ressuage vient de *penetrant testing*. Cependant, il existe de nombreuses autres méthodes qui ne sont pas sujettes à la certification des



contrôleurs, et n'ont donc pas de terminologie normée : c'est le cas par exemple du radar, très utilisé dans le Génie civil.

Méthode END	symbole
Émission acoustique	AT
Courants de Foucault	ET
Étanchéité	LT
Magnétoscopie	MT
Ressuage	PT
Radiographie	RT
Ultrasons	UT
Examen visuel	VT
<i>Shearographie</i>	ST
Thermographie	TT

**Le besoin d'ausculter un ouvrage :**

- vérifier (la conformité des hypothèses)
- détecter (un défaut, un endommagement)
- caractériser (un défaut, un endommagement)

### 3. Le contrôle destructif

Dans l'état actuel des habitudes d'évolution de la qualité du béton dans le domaine de la construction, la méthode la plus utilisée, consiste à faire des essais destructifs à la compression ou à la traction sur des éprouvettes prélevées lors de la réalisation de l'élément structurel. Toute fois, ces méthodes présentent divers inconvénients, du fait que les éprouvettes et les carottes ne sont pas représentatives du béton de structure correspondant, à cause de l'hétérogénéité de ce matériau

#### 3.1. Limite des méthodes destructives :

- mesures locales (ne peuvent être généralisées, sans information préalable peuvent être effectuées au hasard, dans des zones pas forcément représentatives)
- prélèvements pas toujours réalisables (accessibilité, sensibilité des ouvrages, esthétique)
- Coûteux ; ce procédé est cher et endommage la structure, pour cette raison on doit limiter le nombre et les endroits de prélèvement où le béton à examiner.
- L'information acquise n'est pertinente qu'à l'échelle de l'échantillon prélevé qui peut ne présenter qu'un millionième, voir un milliardième de la structure.

Si le laboratoire est le lieu idéal pour la caractérisation fine de l'interface pâte - granulats, il n'est pas forcément adapté à l'analyse d'objets ou de phénomènes couvrant des échelles plus larges.

- les grandeurs issues de mesures sur carottes sont locales: elles ne peuvent être généralisées sans hypothèse supplémentaire.

De plus, sans information préalable, la localisation du prélèvement est généralement réalisée de manière subjective sur des zones pas forcément représentatives, qui sont supposées saines ou altérées.

- Il n'est pas toujours possible de réaliser des prélèvements: soit pour des raisons d'accessibilité, soit pour des raisons de sensibilité de l'ouvrage (une centrale nucléaire par exemple ne doit subir aucun préjudice de dégradation liée à un carottage).

## II Les méthodes de contrôles de béton

### II.A. Contrôles par les méthodes non destructives

Les méthodes non destructives sont des méthodes qui permettent d'évaluer la résistance d'un béton sans que l'on soit obligé d'aller jusqu'à la rupture des éprouvettes. C'est un avantage indéniable lorsque l'on est appelé à établir un diagnostic des ouvrages où les éprouvettes font défaut. Ces techniques peuvent être également d'un grand secours lorsque l'on se trouve face à l'expertise de l'état général d'un grand nombre de bâtiments fortement sollicités, comme c'est le cas des séismes par exemple.

Les appareils utilisés dans le contrôle non destructif sont : [CH.Y] [N.Z]

#### 1. Scléromètre :

Il s'agit sans aucun doute de l'instrument le plus utilisé dans le diagnostic des ouvrages déjà bâtis. Le scléromètre est composé d'une tige en acier, sortant d'un cylindre, qui est appuyée sur le béton et comprime un ressort. En fin de course, ce ressort projette une masse sur la tige, sur laquelle elle rebondit ; ce rebondissement, d'autant plus important que le béton est dur, est mesuré la dureté soit par index (sur les anciens modèles) soit sur un cadran digital pour les modèles récents.

Il existe une relation directe entre la dureté superficielle et la résistance du béton à la compression. [CH.Y] [N.Z]

##### 1.1 Objectif de l'essai :

Cet essai permet de tester l'homogénéité du béton in situ et d'obtenir une estimation rapide de la résistance du béton d'un ouvrage, sans procéder à des prélèvements de béton durci par carottage. [R.D][J.S]

##### 1.2 Principe de l'essai :

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.

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.

Quelques modèles de scléromètres impriment le relevé des résultats sur un rouleau de papier paraffiné. L'indice de rebondissement est une mesure arbitraire, car elle dépend de l'énergie emmagasinée par le ressort et de la dimension de la masse. [NET 4]

**Tableau II.1:** Moyens de mesure selon le type de recul au scléromètre.

Type de recul	Moyen de mesure
Recul linéaire	Un indicateur à lame
Recul angulaire	Un système de freinage

### 1.3 Appareillage :

Il existe plusieurs modèles de scléromètres selon le type de recul ainsi que l'énergie d'impact. Le modèle le plus utilisé est le scléromètre SCHMIDT (Suisse).

L'appareil est composé d'une masselotte chargée par un ressort qui se projette sur une tige métallique appelée tige de percussion. Il est livré avec une pierre à polir et un bloc d'étalonnage. [NET 4]



**Figure II.1 :** Scléromètre ou marteau de Schmidt

### 1.4 Mode Opérateur : [NET 4]

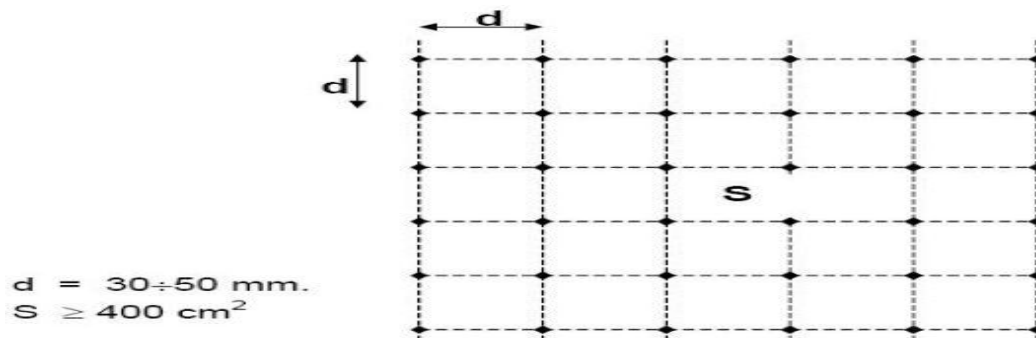
#### 1.4.1 Préparation de la surface :

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

#### 1.4.2 Points de mesures :

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm<sup>2</sup> au moins, et structurée en une grille 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.

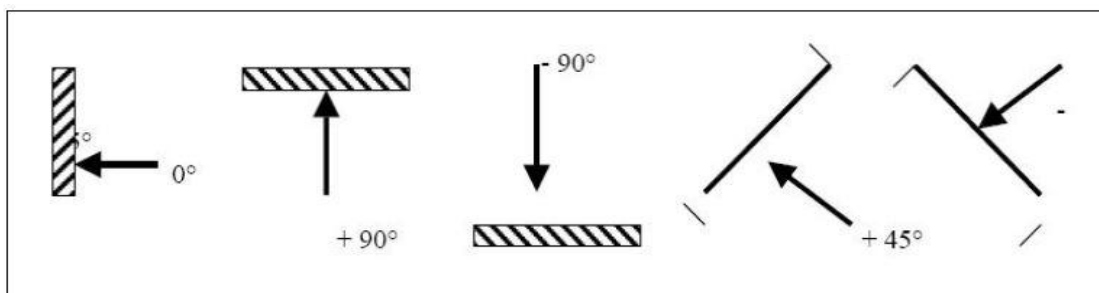


**Figure II.2:** Grille de mesure sur ouvrage

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.

#### 1.5. Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement :

L'indice de rebondissement est la mesure enregistrée sur une échelle graduée fixe par rapport au bâti de l'appareil de scléromètre, après la projection d'une masselotte chargée par ressort sur une tige métallique en contact avec la surface du béton. Cette mesure est fonction de l'angle d'inclinaison de l'appareil par rapport à l'horizontal. [NET 4]



**Figure II.3 :** Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter

### 1.6 Inconvénients de la méthode sclérométrique :

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 soit utile, il ne constitue nullement une mesure fiable de la résistance du béton compte tenu des paramètres influant la précision de détermination de cette résistance. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton. [NET 4]

### 1.7 Références normatives :

NF EN 12504-2

### 1.8 Les avantages de la méthode sclérométrique :

- ✚ 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. [NET 4]

## 2. Méthode d'auscultation dynamique :

### 2.1 Objectif :

Le but de l'essai est d'apprécier la qualité du béton d'un ouvrage, sans procéder à un prélèvement d'éprouvette par carottage. [R.D][J.S]

## 2.2 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. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R ET FACAOARU.

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.



**Figure II.4 :** Appareil de mesure

La relation entre la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques et la résistance à la compression est affectée par un nombre de variables tel que l'âge du béton, les conditions 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 inconvénient 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.

A l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique entre les deux selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN. [NET 4]

Les essais consistant 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 :

- 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 STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984)
- 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.
- 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).
- 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 l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

### 2.3 Mode Opérateur : [NET 4]

#### 2.3.1 Travaux préparatoires :

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé,
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériaux



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

### 2.3.2 Points de mesures :

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

### 2.4 Distances minimales entre points de mesures : [NET 4]

On recommande une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface.

### 2.5 Étalonnage de l'appareil :

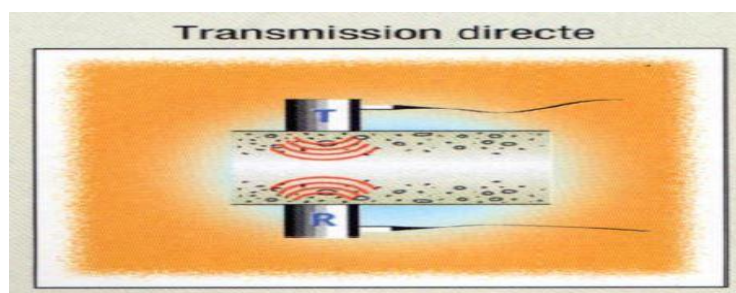
L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige d'étalonnage dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué sur la tige d'étalonnage.

### 2.6 Manières de mesure : [NET 4]

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

#### 2.6.1 Mesure 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.



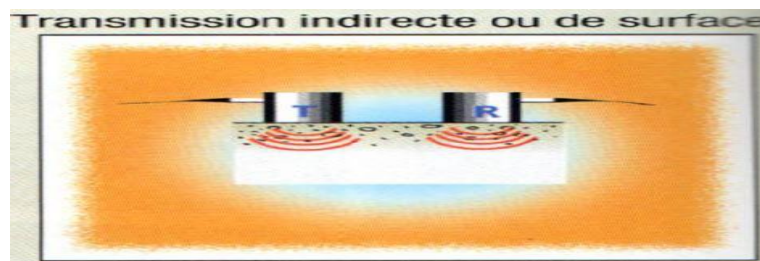
**Figure II.5 :** Mesures en transparence (directe)

### 2.6.2 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.

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

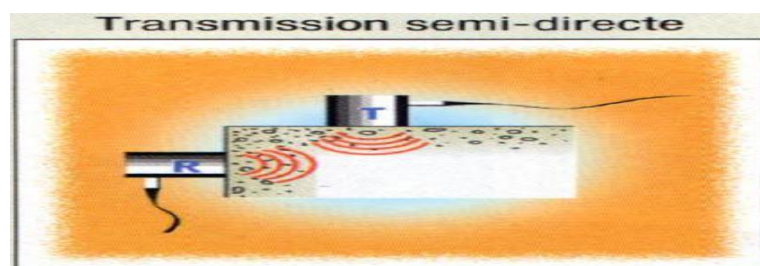
Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.



**Figure II.6:** Mesures en surface

### 2.6.3 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 ne peut pas utiliser les deux autres manières.



**Figure II.7:** Mesures semi directe

## 2.7 Interprétation des résultats de mesure aux ultrasons : [NET 4]

Dans un milieu homogène et isotrope, la vitesse des ondes longitudinales des ultrasons est reliée au module d'élasticité et à la masse volumique. Cette relation donne une base logique pour utiliser des mesures de vitesse des ondes pour estimer la résistance à la compression du béton. Mais il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique unique entre les deux paramètres compte tenu de l'influence des différents constituants entrant dans la composition

du béton. Par conséquent une corrélation plus fiable entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance du béton à la compression ne peut être établie que dans des limites strictes données ci-après.

### 2.7.1 Paramètres influant la vitesse des ultrasons :

La vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Elle dépend énormément du module d'élasticité des granulats et de leur quantité dans le béton. Par ailleurs, la résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Cependant pour un granulats donné et une composition donnée, la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci, telles qu'un changement du rapport Eau/Ciment qui influe le module d'élasticité de la pâte. De plus d'autres facteurs influencent la propagation des ondes sonores à savoir :

- ✓ Le type de ciment ;
- ✓ Le dosage en ciment ;
- ✓ La nature des granulats;
- ✓ La granulométrie ;
- ✓ L'humidité du béton ;
- ✓ La maturité du béton ;
- ✓ Les adjuvants.

### 2.7.2 Autres interprétations possibles :

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré connue. Les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. Seuls les appréciations suivantes sont données :

- Classements qualitatifs :
  - ✚  $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$  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.
- Estimation de la résistance du béton selon RILEM

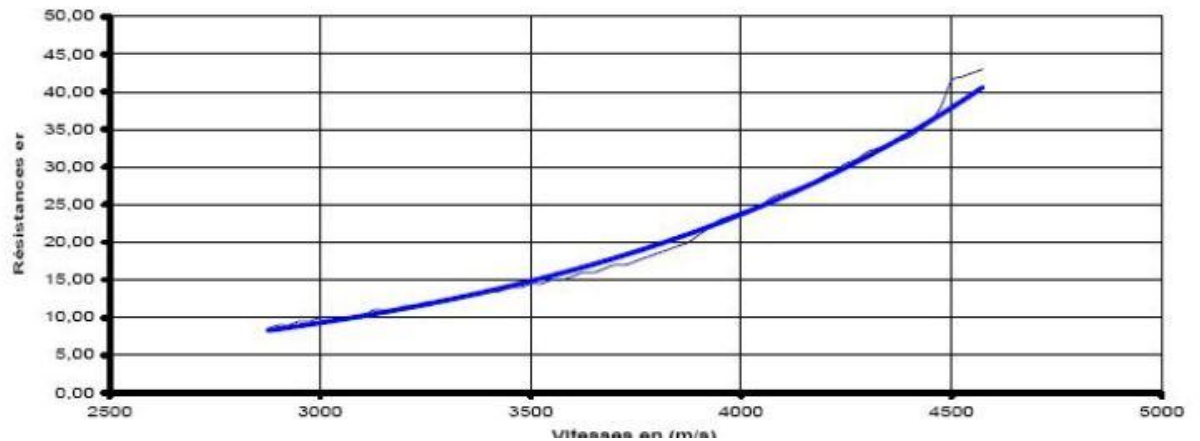


Figure II.8: Courbe RILEM

## 2.8 Références normatives : [NET 4]

Les normes P 18-414 de 1993, P 18-418 de 1989, ASTM C 597- 83 réapprouvée en 1991 et BS 1881 : partie 203 : 1986 spécifient les modes opératoires sans pour autant donner d'interprétation des résultats obtenus.

## 2.9 Les avantages : [NET 4]

- ✚ C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- ✚ L'essai peut être utilisée 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. Et selon CHUNG ET LAW l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides 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 en un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel dégel.
- ✚ ELVERY ET IBRAHIM 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.

### 3. La Maturométrie

#### 3.1. Fondements de la méthode

La maturométrie s'appuie sur la dépendance de la résistance du béton avec son histoire thermique. La loi d'Arrhenius s'est révélée être la plus appropriée pour décrire la sensibilité de la vitesse de durcissement du béton à la température. Elle introduit un paramètre unique, l'énergie d'activation apparente  $E_a$ , qui traduit le degré de sensibilité du béton:

$$K = A \cdot \exp(-E_a/R)$$

Avec :

- A : constante de proportionnalité, 1/s,
- R : constante des gaz parfaits, 8,314 J/mol.K,
- $E_a$  : « énergie d'activation apparente » du béton, J/mol.

Un béton donné est caractérisé par son énergie d'activation apparente et sa courbe de référence (relation maturité/résistance). L'application de la loi d'Arrhenius permet alors de transformer un historique de température en une valeur de maturité d'où une résistance mécanique peut être déduite. L'âge équivalent correspond au temps durant lequel le béton doit être maintenu à la température de référence (en général 20 °C) afin d'obtenir la même valeur de maturité que dans les conditions de cure réelle.

Quelle que soit la voie expérimentale choisie, mécanique (la résistance en compression) ou thermique (la chaleur produite), pour déterminer l'énergie d'activation apparente du béton, la démarche à vocation d'estimer la résistance du béton aux points critiques précédemment définis pour chaque élément. Les valeurs de la résistance  $R_{ci}$  requises, appelées valeurs « cibles », sont communiquées par le bureau d'étude.[B.M/A]

#### 3.2. Méthode d'essai

Le béton testé est fabriqué en respectant scrupuleusement la formule prévue sur chantier. Si les essais sont effectués sur mortier de béton équivalent, la construction de la formule correspondante à partir de la formule utilisée sur chantier, et la fabrication du mortier, doivent

suivre les recommandations spécifiques à cette méthode. Les matériaux sont conservés à la température nécessaire pour le béton ou le mortier confectionné,

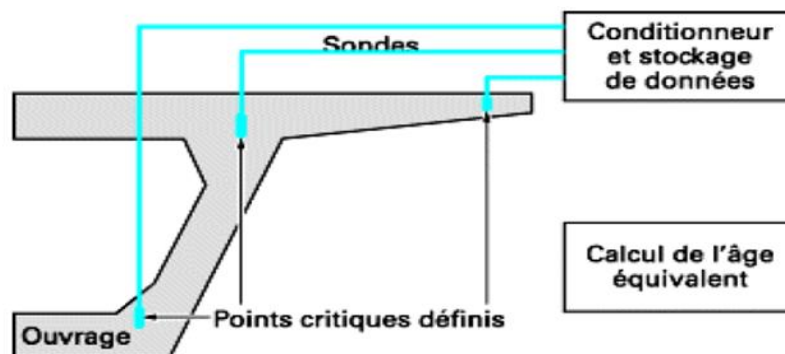
### 3.3. Chaîne de mesure [B.M/A]

Les matériels nécessaires à la maturométrie doivent permettre les relevés de températures, leur stockage, et le calcul des âges équivalents.

Les points critiques de l'ouvrage sont déterminés par le bureau d'étude en comparant les contraintes aux divers points de la structure et les maturités correspondantes aux instants sensibles (décoffrage, levage ou mise en précontrainte). Le nombre de sondes et leur position sont ensuite définis pour ces points critiques.

En fin d'essai de maturométrie, l'appareil doit fournir, pour chaque sonde installée dans l'ouvrage, les éléments suivants :

- L'évolution de la température de chaque sonde, soit sous forme d'un tableau, soit sous forme d'un graphique [ $\theta \text{ } ^\circ\text{C} = f(t)$ ];
- Le calcul de l'âge équivalent pour chaque sonde ;
- La courbe de référence utilisée pour la prédiction de la résistance, si l'appareil le prévoit.



**Figure II.9 :** Schématisation du principe de la méthode maturométrique

### 3.4. Avantages de la maturométrie :

La méthode permet de traiter de façon plus fine l'évaluation de la résistance au jeune âge en définissant, par exemple, les points critiques de l'ouvrage. L'information est quasi-instantanée et ne nécessite pas de transporter des éprouvettes, de fixer ou d'organiser des échéances d'essais de rupture. Elle est également plus riche qu'un simple résultat d'essai de rupture

puisque le délai nécessaire à l'obtention de la résistance requise peut facilement être prévu par extrapolation sur la courbe de température. Les données fournies permettent la vérification de la fiabilité des systèmes d'isolation, ou de chauffage in situ. La maturométrie permet d'évaluer le délai d'obtention de résistances en compression au jeune âge supérieures ou égales à 5 MPa. Au delà de cette valeur, la précision de la mesure devient faible et l'utilisation de la maturométrie est déconseillée. Par ailleurs, on couvre habituellement des plages de résistance ne dépassant pas la moitié de la résistance à 28 jours. Il faut noter que, dans le cas particulier de béton à longue période dormante (température faible ou retard lié à l'adjuvantation), la méthode reste applicable, mais peut perdre de son intérêt (résultats d'étalonnage dispersés conduisant à des prévisions parfois trop, pessimistes). [B.M/A]

#### 4. Contrôle radiographique

La gammagraphie est une technique d'auscultation qui sert principalement à visualiser le niveau de remplissage en coulis des gaines de précontrainte et à apprécier la qualité de ce coulis, en fonction de son opacité. Les radiogrammes obtenus permettent également d'apprécier l'aspect et la position des fils et des torons dans leur gaine qui sont autant d'indices d'une possible perte de tension. La visualisation directe d'une rupture est extrêmement rare et elle se manifeste plutôt par le fait que le câble festonne, c'est-à-dire que son trajet n'est pas parallèle aux autres. Le troisième type d'information fournie par la gammagraphie concerne la gaine elle-même : ses déformations ou ses éventuels accidents. L'auscultation permet aussi la visualisation du positionnement du ferrailage passif. Elle permet enfin une appréciation de l'aspect du béton environnant en en révélant les hétérogénéités et les fissures. Le positionnement des armatures actives ou passives peut être acquis plus largement et plus facilement par la technique du radar géophysique. [NET 5]



Figure II.10 : Appareil de mesure

#### 4.1. Principes fondamentaux

L'intensité d'un faisceau de rayons X ou gamma subit une perte d'intensité en passant à travers un matériau. Ce phénomène est dû à l'absorption ou la diffusion des rayons X ou gamma par l'objet exposé. La quantité de rayonnement perdu dépend de la qualité du rayonnement, la densité du matériau et l'épaisseur traversée. Le faisceau de rayonnement, qui se dégage du matériau, est généralement utilisé pour exposer un film de rayonnement sensible pour que les différentes intensités de rayonnement soient révélées en densités différentes sur le film.

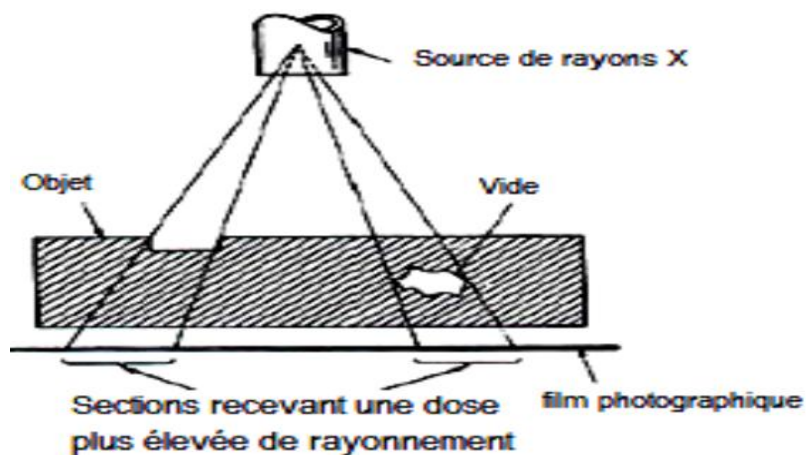
La relation entre l'intensité des photons incidents et transmis est la suivante:

$$I=I_0 e^{-\mu x}$$

Où :

- I est l'intensité du photon transmis,
- $I_0$  est l'intensité du photon incident,
- $\mu$  est le coefficient d'atténuation,
- x est l'épaisseur de l'objet.

La Figure II.9 illustre cette relation. L'échantillon absorbe le rayonnement, mais là où il est mince, où il renferme un vide, moins d'absorption aura lieu. Les zones correspondantes du film sont donc plus sombres. [B.M/A]



**Figure II.11 : Principe de la radiographie [IAEA 02].**



#### 4.2. Equipements de la méthode d'essai radiographique

Trois exigences fondamentales doivent être réunies pour produire des rayons X, à savoir,

- (a) Une source d'électrons comme un filament chauffé,
- (b) Des moyens de diriger et accélérer les électrons comme une alimentation à haute tension,
- (c) Une cible dans laquelle les électrons peuvent bombarder, normalement sous forme de cible de métal lourd.

Ces exigences sont remplies dans un tube à rayons X (**figure II.11**), consistant en une enveloppe de verre dans laquelle deux électrodes sont équipés, une cathode et une anode. La cathode est une source d'électrons. L'application d'une haute tension à travers la cathode et l'anode accélère les premiers électrons, puis les arrêtent tout à coup avec une cible solide montée sur l'anode. L'arrêt du mouvement rapide des électrons résulte dans la génération de rayons X. [B.M/A]

#### 4.3. Applications et limites

Contrairement à la plupart des matériaux métalliques, le béton armé est un matériau hétérogène, composé de :

- composite à faible densité de matrice, constitué d'un mélange de ciment, sable, agrégats et d'eau,
- Des armatures de haute densité constituées de barres d'acier ou de câbles tendus.

La radiographie peut donc être utilisée pour localiser la position de la barre d'armature dans le béton armé et aussi des estimations peuvent être faites du diamètre de la barre et de la profondeur sous la surface. Elle peut révéler la présence de vides, les fissures et les matières étrangères, la présence ou l'absence d'injection de coulis dans la construction post tension et les variations de la densité du béton.

Les principales limites de la radiographie sont que le rayonnement de haute énergie est souvent nécessaire pour des sections épaisses. Si des appareils à rayons X doivent être utilisés, ils peuvent être très lourds, et donc difficiles et longs à mettre en place dans le domaine. Le temps d'exposition est également long. Le coût de la radiographie va être élevé.

L'interprétation des radiographies béton peuvent aussi être difficile, car il n'y a pas de terminologie normalisée pour les imperfections et aucun critère d'acceptation n'est normalisé. La forme complexe de nombreuses structures en béton peut également conduire à des problèmes et la documentation des tests et des rapports peuvent être complexes.

Les recommandations sont basées sur les bonnes pratiques et sont conçues pour fournir des méthodes applicables à l'enquête de béton où la radiographie est appropriée [IAEA 02]. [B.M/A]

## 5. Thermographie infrarouge

### 5.1 Principes fondamentaux

Conformément à la loi fondamentale de Planck tous les objets dont la température est au-dessus du zéro absolu émettent un rayonnement infrarouge **Figure II.12** et **II.13**. Ce rayonnement ne devient visible à l'œil nu que lorsque la température devient supérieure à environ 500°C. Un matériel de surveillance infrarouge a été développé permettant de détecter les émissions infrarouges et de le concevoir comme une image visible. La gamme sensible du détecteur se situe entre 2 et 14 microns. La gamme de 2 à 5,6 microns est généralement utilisée pour visualiser la température entre 40°C et 2000°C et la gamme 8-14 microns est utilisée pour la température ambiante [Weil 89].



**Figure II.12** : Mesures par thermographie infrarouge [Naar 06]

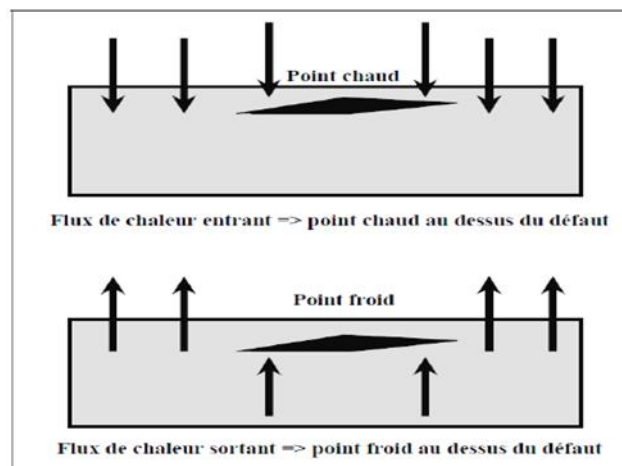


**Figure II.13** : Appareil de mesure

Les thermogrammes pris avec une caméra infrarouge mesurent la distribution de température à la surface de l'objet au moment de l'essai. Il est important de prendre en considération que

cette distribution de la température est le résultat d'un processus dynamique. En prenant un thermogramme de cet objet à un moment avant ou après, ça peut donner lieu à une distribution de température très différente. Cela est particulièrement vrai lorsque l'objet soit chauffé ou refroidi.

La détectabilité de toute structure interne comme les vides, les décollements ou les épaisseurs de couche dépend des propriétés physiques (capacité calorifique, conductivité thermique, la densité, émission) des matériaux de l'objet du test. Naturellement toute «structure» intérieure a un effet sur la distribution de la température à la surface (**figure II.14**). Si la température change sur la surface, il y a un délai avant que l'effet de ce changement ne se produit à l'intérieur, là où existe un défaut, comme un vide. Plus la durée de changement de température est longue, plus le défaut sous la surface est profond.



**Figure II.14** : Effet d'un vide sur la propagation de la chaleur d'une dalle en béton [Carino 03]

Pendant que le système infrarouge mesure seulement les températures de surface, les résultats sont influencés par trois facteurs: (1) de configuration interne, (2) l'état de surface, et (3) l'environnement. En tant que technique de contrôle non destructive pour l'inspection du béton, l'effet de la configuration interne est généralement plus intéressant. Toutes les informations révélées par le système infrarouge reposent sur le principe que la chaleur ne peut être arrêtée de couler de zones chaudes aux zones plus froides, il ne peut être ralenti par l'effet isolant de la matière à travers laquelle il coule. Différents types de matériaux de construction ont différentes capacités d'isolation ou de conductivité thermique. En outre, différents types de défauts du béton ont différentes valeurs de conductivité thermique. Par exemple, un vide d'air a une conductivité thermique inférieure par rapport au béton environnant. Donc dans la

surface d'une section de béton contenant un vide d'air on peut s'attendre à avoir une température légèrement différente d'une section de béton sans vide d'air.

Pour les zones de béton qui ne sont pas accessibles à la lumière du soleil, une alternative est d'utiliser la capacité de stockage de chaleur de la terre pour extraire la chaleur du béton soumis à l'essai. Le point important est que pour utiliser la thermographie infrarouge, la chaleur doit couler dans le béton. Il n'y a aucune importance concernant le sens de coulée de la chaleur.

Le deuxième facteur important est l'état de surface de la zone d'essai... [Weil 88].

Le dernier facteur influant sur la mesure de température d'une surface de béton est le milieu environnant qui l'entoure. Certains des facteurs qui influent sur les mesures de température de surface sont : le rayonnement solaire, la température ambiante et l'humidité de surface.

[B.M/A]

## **5.2 Equipements utilisés dans la thermographie infrarouge**

En principe, afin de tester les anomalies internes du béton, tout ce qui est vraiment nécessaire, c'est un thermomètre à contact sensible. Cependant, même pour une petite zone d'essai, des milliers de lectures devraient être effectuées simultanément afin de définir précisément l'anomalie. Comme ce n'est pas pratique, des caméras infrarouges à haute résolution thermographique sont utilisées pour inspecter de manière efficace et rapide, les zones importantes de béton. Ce type d'équipement permet de couvrir des vastes zones et les données résultantes peuvent être affichées comme des images avec des zones de différentes températures désignées par différentes tonalités en gris dans une image en noir et blanc ou en couleurs différentes sur une image couleur. [B.M/A]

## **6. Le Géo radar**

### **6.1 Le matériel**

Le géoradar fonctionne selon le principe de l'analyse de signaux émis puis réfléchis par des hétérogénéités du milieu étudié. Il prend en compte le temps de trajet aller-retour de l'impulsion électromagnétique ainsi que son amplitude, à la manière d'un échosondeur. Le signal émis possède une large bande de fréquences comprises entre 10 MHz et 2 GHz, l'utilisation de différentes antennes permettant de balayer l'ensemble du spectre en fonction de la profondeur d'investigation désirée et de la taille des objets que l'on recherche. En effet,

à basse fréquence (entre 10 et 100 MHz), la profondeur d'investigation est élevée ( $> 10\text{m}$ ) mais la résolution est plus faible. En revanche, pour des antennes centrées sur 1 GHz ou plus, l'inverse est obtenu et permet par exemple de visualiser de fins détails dans les bétons (**figure II.16**).

Le géoradar se compose de plusieurs éléments, tous aisément manipulables par une seule personne. L'antenne émettrice/réceptrice est déplacée au-dessus de la surface étudiée et sa taille est inversement proportionnelle à sa fréquence centrale. Elle est reliée à une partie électronique de gestion du signal, lequel est transféré à un moniteur d'analyse et de visualisation sur lequel l'opérateur voit en temps réel un profil vertical de sol/structure généré par les multiples réflexions des fronts d'ondes. [B.M/A]



**Figure II.15** : Un système géoradar portable comportant une antenne centrée sur 400 MHz.



**Figure II.16** : Un système géoradar spécial pour les surfaces réduites.

## 6.2 Application aux bâtiments et ouvrages d'art

Il existe de nombreuses applications possibles du géoradar en génie civil, notamment pour ce qui concerne l'auscultation des bétons et des matériaux de construction. Equipé d'une antenne haute fréquence légère, un opérateur est en mesure de détecter rapidement et de localiser très précisément les composants internes métalliques ou non (ferrailages, ancrages, câbles, tuyaux, défauts, etc.) sur des murs, radiers, piles et tabliers de ponts, parements, avec une profondeur d'investigation pouvant aller jusqu'à 1 m [Klysz 04]. Il est également possible d'en estimer l'état de vieillissement interne (cartographie d'amplitude), ou de détecter la présence de vides. Le béton étant un matériau relativement homogène, les images délivrées sont souvent de bonne qualité et permettent, si besoin, d'obtenir par voie logicielle une modélisation tridimensionnelle de structure interne [Sbartai 05]. Le géoradar est actuellement la technique la plus compétitive dans ce domaine.

La sensibilité des ondes radar à l'état d'humidité des matériaux (ex : sol, béton) a été rapportée par des nombreux auteurs [Greaves 96, Laurens 02, Sbartai 04, Klysz 05]. L'augmentation de la teneur en eau du béton conduit à une forte variation des paramètres du signal radar. Cela est généralement dû à l'augmentation de la permittivité et la conductivité du béton. Ainsi la présence d'eau et/ou des fissures remplies d'eau (signes caractéristiques de la RAG) peut affecter le comportement du signal radar. [B.M/A]

## 7. Impact-écho

### 7.1 Principe de base

Cette technique est basée sur l'étude d'ondes micro sismiques. Une pulsation (onde) est introduite à l'intérieur d'un spécimen en béton par le biais d'une source d'impact d'origine mécanique. L'onde de contrainte se propage alors dans le matériau sous la forme d'un train d'ondes hémisphériques. Ces ondes s'appellent des ondes de front. Les ondes de front sont constituées à la fois d'ondes de compression et de cisaillement. Les ondes de compression et de cisaillement sont reflétées par les interfaces internes du matériau et les bornes du spécimen. Ces ondes sont par la suite reflétées en forme d'écho à la surface où l'impact est produit. Les échos produisent des déplacements à la surface qui sont captées par un récepteur et ensuite enregistrés sur un oscilloscope digital. L'oscilloscope enregistre les trois formes d'ondes discutées précédemment. L'onde Rayleigh produit toujours un signal d'une amplitude plus grande que les ondes de compression et de cisaillement grâce à des mouvements elliptiques de surface. Toutefois, ces ondes ne sont pas considérées dans l'analyse Impact-Écho à cause de leur faible pénétration en profondeur. L'onde de compression fait partie de l'information captée par le récepteur. [B.M/A]

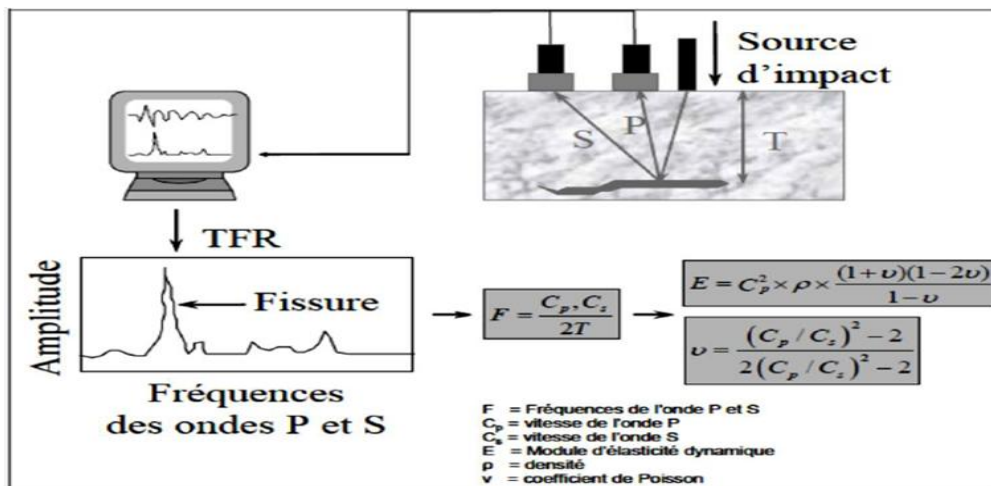
### 7.2 Analyse des données

La méthode d'analyse des données par l'étude des fréquences est un développement majeur du système Impact-Écho. Les ondes de compression sont produites par un impact et subissent des réflexions multiples entre la surface d'essai et l'interface de réflexion. Chaque fois que l'onde de compression arrive à la surface, celle-ci produit un déplacement qui est une caractéristique

[B.M/A]

### 7.3 Le temps de contact

La durée de contact entre le spécimen et la source d'impact est un aspect clé de la méthode Impact-Écho. En effet, le temps de contact détermine le contenu fréquentiel du train d'onde généré par la source d'impact. Ceci implique que le temps de contact sur la surface détermine les dimensions, de même que la profondeur des défauts qui peuvent être observées sous la surface. Plus le temps de contact est court, plus le contenu fréquentiel de l'onde est caractérisé par des composantes de fréquences élevées (faibles longueurs d'ondes). Il est ainsi plus facile de détecter des défauts de faibles envergures de même que des anomalies localisées très près de la surface de contact. Pour ces raisons, il est recommandé d'utiliser un temps de contact court pour les essais sur dalles de béton. À première vue, la composante fréquentielle la plus élevée ( $f_{\max}$ ), ayant une forte amplitude dans le train d'onde, est équivalente à l'inverse du temps de contact. Par exemple, un temps de contact de 100  $\mu$ s est équivalent à une fréquence maximale d'environ 10 kHz [Hassani 97].



**Figure II.17:** Vue schématique de la méthode Impact-Écho [Hassani 04].

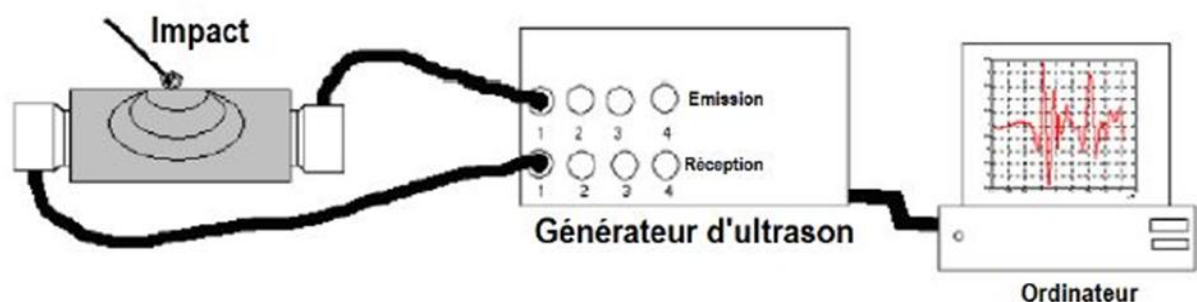
Les sources d'impacts ont des formes variées, mais les plus populaires prennent la forme de marteaux ou de sphères d'acier. Les marteaux produisent des énergies d'impact élevées dû au temps de contact long ( $> 1$  ms) sur la surface. Ce temps de contact est utilisé sur des structures élancées en béton, mais n'est pas acceptable pour des structures telles que des dalles et autres structures moins élancées. En utilisant des sphères ou des sources d'impacts à ressort et à bouts sphériques, des temps de contacts de 20 à 60  $\mu$ s peuvent être générés. Les sphères d'impacts possèdent un avantage important sur le marteau; le temps de contact est directement

proportionnel au diamètre de la sphère. Cette simplicité et versatilité expliquent ainsi la popularité de cette méthode auprès des chercheurs. [B.M/A]

### 8 .Acoustique non linéaire : le saut temporel

En acoustique non linéaire, nous provoquons par une onde de forte amplitude l'ouverture-fermeture des microfissures. Ces ouvertures-fermetures des microfissures contribuent à la modification des propriétés élastiques du milieu, entraînant ainsi son comportement non Linéaire. Plus le béton est endommagé plus il est non linéaire. Pour évaluer cette non-linéarité, on utilise des rafales d'ondes ultrasonores pour sonder le milieu pendant qu'on applique un impact qui génère une onde basse fréquence et haute amplitude provoquant l'ouverture fermeture des microfissures. À partir des outils de traitement du signal, on évalue le décalage de temps d'arrivé de l'onde avant l'impact et après l'impact. Plus le matériau est endommagé, Plus grand est le décalage de temps [Kodjo 08].

Ce décalage peut être calculé pour trois types d'onde de volume, à savoir les ondes de compression, les ondes de cisaillement et les ondes coda. Les ondes coda résultent d'une superposition de plusieurs ondes secondaires provenant de l'incidence d'ondes primaires sur les hétérogénéités du béton [Herraiz et Espinosa]. Elle permet d'obtenir de l'information sur l'état d'un plus grand volume de matériau et non seulement sur une trajectoire précise. La configuration de test est présentée à la figure II.18. Lorsque les dimensions de la structure à investiguer le permettent, les deux transducteurs émetteur-récepteur utilisés pour le sondage sont positionnés en mode transmission directe, dans le cas contraire les deux transducteurs seront posés sur la même face, configuration que nous appelons transmission indirecte. [B.M/A]



**Figure II.18:** Configuration de test non linéaire : saut temporel [Kodjo 08]



## II.B. Contrôles par les méthodes destructives

### 1. Essai de traction par fendage : [K.N]

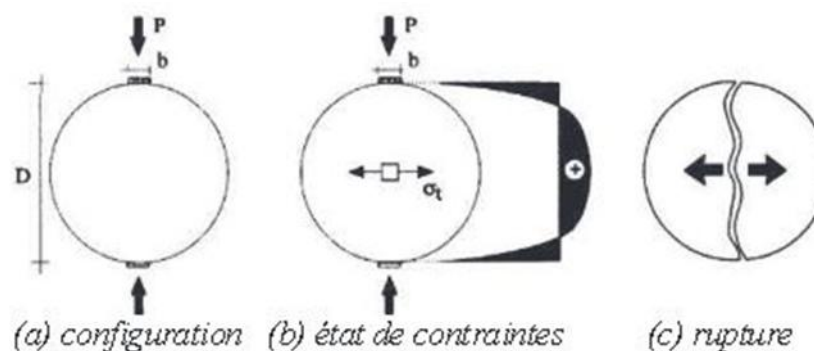
#### 1.1 Objet de la norme

La présente norme a pour objet de définir l'essai de rupture par fendage, dit « essai de traction par fendage », ou plus brièvement « essai de fendage », des éprouvettes en béton. (Cet essai est connu également sous les désignations suivantes : essai mesnger, essai de traction indirecte, essai de traction-écrasement, essai brésilien...essai de compression diamétrale quand il est normalement exécuté sur éprouvettes cylindriques.)

Cet essai, qui peut être :

- Un essai de recherche,
- Un essai d'étude, de convenance ou de contrôle,

Permet de déterminer une caractéristique du béton essayé, dite « résistance à la traction par fendage »



FigureII.19 : Essai de fendage

#### 1.2 Eprouvettes

Les éprouvettes doivent être des éprouvettes cylindriques obtenues par moulage (l'essai de traction par fendage peut exceptionnellement et provisoirement être exécuté sur éprouvettes cubique ; mais résultat obtenu ne caractérise pas la résistance à la traction par fendage du béton essayé.

Remarque : les éprouvettes cubiques ne peuvent être employées que dans le domaine de la recherche. Pour le format des moules, les tolérances dimensionnelles de forme des moules et éprouvettes, se reporter à la norme NF P 18-402.

Pour la confection et la conservation des éprouvettes, se reporter. Suivant la catégorie de l'essai, à celles des normes NF P 18-403 ou NF P 18-404, applicable à l'essai effectué.

### **1.3. Machine d'essai**

La machine d'essai est une presse de force appropriée, qui doit être conforme à la norme NF P 18-401. Elle doit être contrôlée et étalonnée conformément à cette norme.

### **1.4. Bandes de chargement**

Bandes neuves en contre-plaqué okoumé ayant pour dimensions, l'étant la longueur suivant laquelle la charge est transmise à l'éprouvette (dimensions exprimée en millimètres)

### **1.5. Opérations préparatoires**

#### **1.5.1. Précautions contre la dessiccation**

Les précautions suivantes doivent être prises contre la dessiccation des éprouvettes depuis le moment où elles sont sorties du local de conservation jusqu'au moment de l'essai.

a) Transporter les éprouvettes de la salle de conservation à la salle d'essais peu de temps avant l'essai, juste le temps nécessaire aux opérations préparatoires.

b) Eprouvettes conservées dans l'eau

Retirer de l'eau une à une chaque éprouvette de la série, l'essuyer, la peser, la mesurer éventuellement et, si nécessaire, déterminer les génératrices de chargement. L'enfermer dans un sachet en film de polyéthylène clos à son extrémité supérieure.

Transporter la série d'éprouvettes près de la machine d'essais et ne sortir chacune d'elles du sachet qu'au moment de l'essai.

c) Eprouvettes conservées en sachets de polyéthylène

Transporter la série d'éprouvettes dans la salle d'essai, sortir une à une chaque éprouvette du sachet, enlever le produit de cure qui serait en excès et continuer les opérations préparatoires

**1.5.2. Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de sa masse volumique**

- a) L'éprouvette ayant été essuyée ou nettoyée, la peser avec une erreur relative inférieure à 0.001.
- b) Eventuellement, calculer sa masse volumique avec trois chiffres significatifs en divisant sa masse :
  - par le volume correspondant aux dimensions de fabrication,
  - ou par le volume résultant des dimensions assurées avec une erreur relative inférieure à 0.003

**1.5.3. Choix des génératrices de chargement**

- a) Si l'on a l'assurance que chacun des moules employés répond, en tout point de la surface cylindrique, à la tolérance de rectitude des génératrices pour la catégorie d'essai effectuée, choisir deux zones génératrices opposées et procéder au traçage indiqué ci-après(b).

Sinon rechercher, les zones diamétrales qui présentent le minimum d'erreur de rectitude des génératrices.

Indiquer au compte rendu l'erreur de rectitude maximale mesurée.

- b) A une des extrémités de l'éprouvette, à l'aide d'un calibre ou de tout autre moyen approprié, marquer deux points diamétrales qui présentent opposés définissant les deux génératrices de chargement.

**1.6. Conduite de l'essai****1.6.1. Mise en place et centrage de l'éprouvette**

Placer l'éprouvette et les bandes de chargement entre les plateaux de la presse. Veiller à ce que le milieu des bandes coïncide avec chacun des points marqués précédemment sur l'éprouvette et à ce qu'elles soient exactement alignées dans le plan médian de l'éprouvette.

Si la presse le permet, plaquer la rotule dans une position telle que le plateau supérieur soit parallèle au plateau inférieur. Sinon, caler l'éprouvette et veiller à son centrage au début du chargement.

### **1.6.2. Mise en charge**

Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs. La vitesse de chargement doit être constante (pendant toute la durée de l'essai) et égale à 0.5 bar par seconde avec une tolérance de  $\pm 0.1$  bar par seconde.

Au moment où, avant la rupture, l'éprouvette se déforme rapidement, n'apporter aucune modification aux commandes de la machine d'essais.

### **1.6.3. Expression des résultats**

Retenir pour charge de rupture, la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et calculer la contrainte correspondante,  $T_{\text{fendage}} = (0.637F) / (ah)$ , où F est la charge de rupture en déca newtons, a le diamètre et h la hauteur (normalisés ou effectifs) exprimés en centimètres

## **2. Essai de traction directe : [K.N]**

### **2.1. Objet de la norme**

La présente norme a pour objet de définir l'essai de rupture par traction directe, ou plus brièvement l'essai de traction directe des éprouvettes en béton.

Cet essai, qui peut être :

- Un essai de recherche (NF P 18-403),
- Un essai d'étude, de convenance ou de contrôle (NF P 18-404),
- Un essai d'information,

Permet de déterminer une caractéristique du béton dite « résistance à la traction directe »

### **2.2. Eprouvettes**

Les éprouvettes doivent être des éprouvettes cylindriques, tirées par sciage d'éprouvettes obtenues soit par moulage, soit par carottage dans le béton durci de l'ouvrage.

Pour la conservation et la confection des éprouvettes, se reporter, suivant la catégorie de l'essai, à celle des normes NF P 18-403, NF P 18-404, applicable à l'essai effectué.

### **2.3. Machine d'essai**

La machine d'essai est une machine de traction qui doit être conforme aux normes P18-411.

Elle doit être contrôlée et étalonnée conformément à ce document.

### **2.4. Dispositifs de traction**

Chaque dispositif de traction, en acier, comprend :

- une plaque destinée à être fixée par collage à la face de chargement de l'éprouvette,
- une contre-plaque fixée sur la précédente et présentant un évidement destiné à recevoir une rotule hémisphérique, dont le centre coïncide avec celui de la face de collage de la plaque,
- une tige solidaire à une de ses extrémités de la rotule hémisphérique et qui peut être fixée à la machine de traction.

### **2.5. Opérations préparatoires**

#### **2.5.1. Précautions contre la dessiccation**

Les précautions suivantes doivent être prises contre la dessiccation des éprouvettes, depuis le moment où elles sont sorties du local de conservation jusqu'à celui de l'essai.

- a) Transférer les éprouvettes de la salle de conservation à la salle d'essai le moins longtemps possible avant l'essai (juste le temps nécessaire aux opérations préparatoires).
- b) Eprouvettes conservées dans l'eau

Retirer de l'eau une à une chaque éprouvette de la série, l'essuyer et l'enfermer dans un sachet en film de polyéthylène d'épaisseur 0.10 mm, successivement sur les éprouvettes de la série aux opérations préparatoires suivantes :

- sortir l'éprouvette du sachet. Procéder au sciage de ses extrémités et la renfermer dans le sachet,

- Sortir l'éprouvette. Procéder au contrôle et, éventuellement, au moulage des faces de chargement. La renfermer dans le sachet,
- sortir l'éprouvette raccourcie. La peser et la mesurer .la renfermer dans le sachet,
- Sortir l'éprouvette raccourcie du sachet. Fendre le fond de celui-ci et y replacer l'éprouvette en retournant les extrémités du sachet de manière que les deux bords ainsi obtenus alleurent exactement les faces à encoller ; fixer chacun d'eux par un bracelet élastique,
- si cela est nécessaire, sécher la face supérieure à l'aire chaude soufflé à 50-80°C. Clos à son extrémité supérieure.

Transporter la série d'éprouvettes dans la salle d'essais et procéder

La recouvrir de colle et y placer une plaque de traction,

- Lorsque l'adhérence est suffisante, retourner les éprouvettes. Recouvrir l'autre face de colle et y placer la deuxième plaque de traction,
- placer les éprouvettes raccourcies munies de leurs plaques de traction et protégées par le film de polyéthylène sous le plateau d'une presse. Les y laisser le temps nécessaire,
- procéder à l'essai, l'éprouvette étant toujours entourée du film de polyéthylène.

De cette façon, sauf pendant le sciage et le contrôle des extrémités, le pesage et le mesurage de l'éprouvette raccourcie, le séchage et l'encollage des faces de chargement, l'éprouvette est toujours protégée périphériquement contre la dessiccation.

c) Eprouvettes conservées en sachet de polyéthylène

Transporter la série d'éprouvettes ensachées dans la salle d'essais. Sortir chacune d'elles du sachet. Pour celles en moule carton, retirer celui-ci. Pour celles seulement en sachet, enlever le produit de cure qui serait en excès.

Renfermer l'éprouvette dans le sachet.

Procéder successivement sur les éprouvettes de la série aux opérations

### 2.5.2. Sciage des extrémités de l'éprouvette

Scier chaque extrémité de l'éprouvette de manière à enlever la couche de laitance et la partie plus ou moins hétérogène du béton.

Veiller à ce que le plan de sciage soit perpendiculaire aux génératrices.

### 2.5.3. Contrôle des faces de chargement

Après sciage des extrémités, les faces destinées au collage doivent être planes et parallèles.

- L'angle formé par ces faces avec la direction des génératrices ne doit pas différer de  $90^\circ$  de plus de  $1/4^\circ$ , de façon que le défaut de parallélisme soit certainement inférieure à  $1/2^\circ$ .

- chaque face ne doit pas s'écarter d'un plan de contact de plus de 0.15mm

Si une ou deux des conditions ci-dessus ne sont pas satisfaites, procéder par moulage jusqu'à ce que les défauts soient inférieurs aux tolérances ci-dessus.

### 2.5.4. Détermination de la masse volumique

Peser l'éprouvette essuyée ou nettoyée. Mesurer hauteur et diamètre de l'éprouvette raccourcie avec une erreur relative inférieure à 0.003 pour chaque mesure. En déduire la masse volumique du béton avec trois chiffres significatifs.

### 2.5.5. Collage des faces de chargement aux plaques de traction

Nettoyer soigneusement les extrémités de l'éprouvette et, au besoin, les sécher à l'air chaud soufflé à  $50-80^\circ\text{C}$ . Frotter la surface des plaques de traction, avec de l'acétone par exemple, pour enlever toute trace de graisse.

Appliquer la colle (la colle utilisée doit être telles que le joint de collage soit plus résistant que l'effort de traction déterminant la rupture de l'éprouvette).

Laisser les éprouvettes sous la presse longtemps avant l'essai pour que le durcissement de la colle soit complet et qu'il n'y ait pas risque d'arrachement du joint de colle à l'essai (par exemple, 48 h pour la colle à base de résine époxyde).

### 2.5.6. Conduite de l'essai

#### - Mise en place et centrage de l'éprouvette

Fixer l'éprouvette, munie de ses plaques de traction et toujours entourée du film de polyéthylène, aux dispositifs de traction dans la machine, en veillant particulièrement au centrage de l'éprouvette.

L'erreur de centrage doit être inférieure à 1/100 du diamètre.

#### - Monter en charge

Appliquer l'effort de traction sans chocs et d'une manière continue : la vitesse de montée en charge doit être constante pendant toute la durée de l'essai et calculer la contrainte correspondante T directe en bars par la relation :

$$T \text{ directe} = R/S$$

Où F est l'effort de traction maximal en déca newtons, et S la section normale ou effective de l'éprouvette en cm<sup>2</sup>.

#### - Récupération des plaques de traction

Pour récupérer les plaques, les traiter par un moyen approprié permettant de les séparer du reste de l'éprouvette.

## 3. Essais de traction par flexion : [K.N]

### 3.1. Objet de la norme

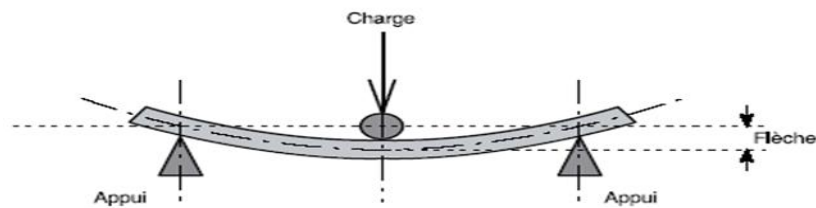
La présente norme a pour objet de définir l'essai de rupture par flexion, dit ( essai de traction par flexion ) ou plus brièvement (essai de flexion) , des éprouvettes en béton.

Cet essai, qui peut être :

- un essai de recherche,
- un essai d'étude, de convenance ou de contrôle,
- un essai d'information,



Permet de déterminer une caractéristique du béton essayé, dite (résistance à la traction par flexion).



**Figure II.20** : Essai de flexion

### 3.2. Résistance à la traction par flexion

Résistance à la rupture, exprimée sous forme de contrainte, déterminée par l'essai défini par la présente norme.

### 3.3. Epreuve

Les éprouvettes sont des éprouvettes prismatiques qui doivent être conformes à la norme NFP 18-401.

Pour la confection et la conservation des éprouvettes, se rapporter, suivant la catégorie de l'essai, à celle des normes NFP 18-403, NFP 18-404 applicable à l'essai effectué.

### 3.4. Machine d'essai

La machine employée dans l'essai de traction par flexion doit être conforme à la norme expérimentale P 18-411. Elle doit être contrôlée et étalonnée conformément à cette norme.



**Figure II.21** : Portiques pour essais de flexion

### 3.5. Appareil de chargement

L'appareil de chargement doit transmettre la charge à des appuis horizontaux définissant exactement la ligne d'application de celle-ci et la répartissant sur l'éprouvette de manière aussi uniforme que possible. IL doit, en outre, n'introduire aucun effet de torsion pendant l'essai.

Les appuis sont constitués par des rouleaux en acier, de forme cylindrique au moins dans la zone d'appui, dont la portée en contact avec l'éprouvette est rectifiée et a un rayon de courbure de 20 mm au voisinage de la ligne de contact.

Les appuis 1 et 3 doivent pouvoir osciller autour d'axes passant par les centres, parallèles au grand axe de l'appareil et de l'éprouvette et situés dans le plan de flexion (plan vertical contenant l'axe de l'appareil) ; les appuis 2 et 4 doivent être déplacés légèrement au cours de l'essai. La charge est appliquée aux appuis 3 et 4 par l'intermédiaire d'une rotule.

Les appuis sont parallèles entre eux et leur distance est définie à  $\pm 1\%$ .

### 3.6. Opérations préparatoires

#### 3.6.1. Précautions contre la dessiccation

Les précautions suivantes doivent être prises contre la dessiccation des éprouvettes depuis le moment où elles sont retirées du local de conservation jusqu'à celui de l'exécution de l'essai.

##### **a) Dans tous les cas :**

Transporter les éprouvettes de la salle de conservation à la salle d'essai peu de temps avant l'essai.

##### **b) Eprouvettes conservées dans l'eau :**

Les retirer de l'eau une à une, les sécher, les peser, les mesurer et les contrôler éventuellement, les enfermer dans une enveloppe en film de matière plastique d'épaisseur minimale 0,1 mm, étanche et close à ses deux extrémités.

Transporter la série d'éprouvettes dans la salle d'essai et ne sortir chaque éprouvette de son enveloppe plastique qu'au moment de l'essai.

On pourrait aussi transporter la série d'éprouvettes dans la salle d'essai et employer tout autre procédé de protection efficace contre la dessiccation : dans ce cas, l'indiquer au compte rendu des essais.

**c)Eprouvettes conservées dans une enveloppe en matière plastique :**

Transporter la série d'éprouvettes dans la salle d'essai, sortir chacune d'elles et leur enveloppe, enlever le produit de cure qui serait en excès, la peser, la mesurer et la contrôler éventuellement, l'enfermer à nouveau dans l'enveloppe jusqu' au moment de l'essai.

**3.6.2. Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de sa masse volumique**

L'éprouvette étant essuyée ou nettoyée, la peser avec une erreur relative inférieure à 0,001.

Eventuellement, calculer sa masse volumique avec trois chiffres significatifs en divisant sa masse :

- par le volume correspondant aux dimensions de fabrication, si l'erreur relative de chacune de trois dimensions est inférieure à 0,003 (essais de recherche) ou 0,005 (autres catégorie d'essai). (Dans la pratique, vérifier cette condition pour la longueur de l'éprouvette ; pour les arêtes a de la section du prisme, vérifier qu'elles sont comprises dans les limites du tableau de la norme P 18-401.) ;
- Dans le cas contraire, par le volume résultant des dimensions mesurées avec une erreur relative inférieure à 0.003.

**3.6.3. Contrôle des tolérances de formes de l'éprouvette**

Se reporter aux articles de la norme NF P 18-401.

**3.6.4. Conduite de l'essai**

**- Mise en place et centrage de l'éprouvette**

Placer l'éprouvette dans l'appareil de chargement ou l'appareil de chargement en prenant normalement comme faces de chargement ses faces de moulage et en veillant à placer son axe longitudinal dans le plan de flexion de l'appareil ou de la variante.

### - Mise en charge

Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs : la vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 0.5 bar par seconde avec une tolérance de  $\pm 0,1$  bar par seconde.

Au moment où, avant sa rupture, l'éprouvette se déforme rapidement, n'apporter aucune modification aux commandes de la machine d'essai.

### 3.6.5. Expression des résultats

Retenir pour charge de rupture la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et calculer la Contrainte correspondante  $T_{flexion}$  par la formule suivante :

$$T_{flexion} = [1,8F/A^2],$$

Qui est déduite de la formule générale :

$$T_{flexion} = [6M /bh^2],$$

dans laquelle on introduit un coefficient 0,6 et où  $M=F/6$  et ici  $b$  (largeur) =  $a$ ,  $I$ (distance entre appuis) =  $3 a$ , ce qui donne  $T_{flexion} = [0,6 (3 f) / a^2]$  où  $F$  est la charge en déca newtons et  $a$  le coté de la base en centimètres (à condition qu'il soit égal à  $3 a$  ou  $4 a$ ).

## 4. Essais de compression : [K.N]

### 4.1. Objet de la norme

La présente norme a pour objet de définir l'essai de rupture par compression, dit « essais de compression » des éprouvettes en béton.

Cet essai, qui peut être :

- un essai, de recherche,
- un essai, d'étude, de convenance ou de détection,
- un essai, d'information ou de détection,

permet de déterminer une caractéristique du béton essayé, dite « résistance à la compression ».

### 4.2. Définition de la résistance à la compression

Résistance à la rupture, exprimée sous forme de contrainte, déterminée par l'essai défini par la présente norme.

### 4.3. Eprouvettes

Les épreuve doivent être cylindriques soit obtenues par moulage, soit prélevées par carottage dans le béton frais ou durci de l'ouvrage.

Pour la confection et la conservation, se rapporter, suivant la catégorie de l'essai, à celles des normes NF .P 18 – 404 applicables à l'essai effectué.

### 4.4. Machine d'essai

La machine d'essai est une presse pour matériaux durs, qui doit être conforme à la norme à la NF.P.18 – 411(ci-après).

Elle doit être contrôlée et étalonnée conformément à ces documents.

Les Plateaux ou contre-plateaux de la presse doivent avoir des dimensions égales ou légèrement supérieures à celles des faces de l'éprouvette soumise à l'essai.



**Figure II.22 :** Machine d'essais de compression

### 4.5. Opérations préparatoires

#### 4.5.1. Précautions contre la dessiccation

Les précautions suivantes doivent être prises contre la dessiccation des éprouvettes cylindriques, depuis le moment où elles sont sorties de la salle de conservation, jusqu'à celui de l'exécution de l'essai.

a) Transférer les éprouvettes de la salle de conservation à la salle d'essai peu de temps avant l'essai, juste celui nécessaire à l'exécution des opérations préparatoires.

b) Eprouvettes conservées dans l'eau

Retirer de l'eau une chaque éprouvette de série, l'essuyer, la peser, la mesurer éventuellement et l'enfermer dans un sachet en film de polyéthylène d'épaisseur 0,01 mm clos à son extrémité supérieure.

Transporter la série d'éprouvette dans la salle d'essais et opérer sur chacune d'elles de la façon suivante :

- Retire l'extrémité supérieure du sachet autour de la partie supérieure de l'éprouvette de manière que le bord retourné du sachet soit en retrait de 1 cm par rapport à la face de chargement, fixer le bord retourné dans cette position par un bracelet élastique. Procéder au surfaçage et au contrôle éventuel de l'extrémité surfacé. Refermer le sachet.
- Retourner l'éprouvette, fendre le fond du sachet et le retourner de manière que le bord obtenu soit en retrait de 1 cm par rapport à la deuxième face de chargement. Fixer le bord retourné dans cette position par un bracelet élastique et procéder au surfaçage et au contrôle éventuel de la deuxième face surfacé. Refermer le sachet à sa deuxième extrémité.

Ne sortir l'éprouvette du sachet qu'au moment de l'essai de cette façon, sauf pendant le pesage et le mesurage éventuel de l'éprouvette, le surfaçage et le contrôle éventuel de ses extrémités surfacées, l'éprouvette est toujours protégée périphériquement contre dessiccation.

### c)Epreuves conservées en sachets de polyéthylène

Transporter la série d'éprouvette en sachets dans la salle d'essais. Ces éprouvettes peuvent être l'une des deux sortes suivantes :

- celles obtenues dans des moules métalliques ou en matière plastique qui ont été démoulées puis ensachées,
- celle obtenues dans des moules en carton et qui ont été ensachées avec les moules.

Sortir les éprouvettes une à une de leur sachet : pour celles de la première sorte, enlever le produit de cure qui serait en excès ; pour celles de la deuxième sorte, retirer le moule en carton, peser l'éprouvette et la mesurer éventuellement. Le refermer dans le sachet.

- Continuer sur chaque éprouvette de la série les opérations spécifiées au deuxième paragraphe de l'article b (ci-dessus).

Ne sortir l'éprouvette du sachet qu'au moment de l'essai.

#### 4.5.2. Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de la masse volumique

L'éprouvette ayant été essuyée ou nettoyée, la peser avec une erreur relative inférieure à 0,001.

Eventuellement, calculer sa masse volumique avec 3 chiffres significatifs, en divisant sa masse :

- par le volume correspondant aux dimensions de fabrication,
- dans un cas contraire, par le volume résultant des dimensions mesurées avec erreur relative inférieure à 0,003.

#### 4.5.3. Surfaçage des extrémités

a) Mode opératoire

Surfacer successivement chacune des extrémités de l'éprouvette cylindrique en se servant de l'appareil de surfaçage.

b) Contrôle de planitude et de l'orthogonalité des extrémités surfacées.

Si l'appareil de surfaçage, récemment contrôlé, répond aux tolérances, il n'est pas nécessaire de procéder à ce contrôle.

Si non les extrémités, une fois surfacées, doivent répondre aux tolérances de forme suivantes :

Format de l'éprouvette	Plénitude mm	Orthogonalité
Cylindre de 11	0,10	1/8°
Cylindre de 16	0,12	
Cylindre de 25	0,16	

#### 4.5.4. Conduite de l'essai

- **Mise en place dans la presse**

Si on utilise un contre-plateau inférieur, placer celui-ci, sa surface traitée étant tournée vers le haut, sur le plateau inférieur de la presse exactement à la verticale du plateau supérieur.

Nettoyer les faces de chargement des plateaux ou contre plateau, veiller à ce que les faces de chargement de l'éprouvette soient parfaitement propres.

Centrer l'éprouvette sur les plateaux ou contre-plateaux.

L'erreur de centrage doit être inférieure à 1/100 du diamètre de l'éprouvette.

- **Mise en charge – vitesse de chargement**

Il est recommandé, lorsque le plateau supérieur comportant la rotule est amené au contact de l'éprouvette, de le faire pivoter à la main afin de réaliser un contact uniforme.

Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs.

La vitesse de chargement doit être constante et pendant toute la durée de l'essai et égale à 5 bars par seconde avec une tolérance de +2 bars par seconde.

Au moment où, avant sa rupture, l'éprouvette se déforme rapidement n'apporter aucune modification aux commandes de la presse.

#### **4.5.5. Expression des résultats**

Retenir, pour charge de rupture, la charge maximale enregistrée au cours de l'essai et calculer la contrainte correspondante en bars.



### III Présentation des résultats de quelques travaux antérieurs :

Dans ce chapitre nous avons essayé de regrouper quelques travaux antérieurs et qui ont traité les relations entre les méthodes destructives et les méthodes non destructives dans le contrôle de la qualité de béton

#### III.1 Corrélations entre essais non destructifs et essais destructifs du béton à faible résistance mécanique [B.KH][G.M][K.S]

- **KHODJA ALI BENYAHIA1, MOHAMED GHRICI1, SAID KENAI**
  - **Résultats d'essais au scléromètre**

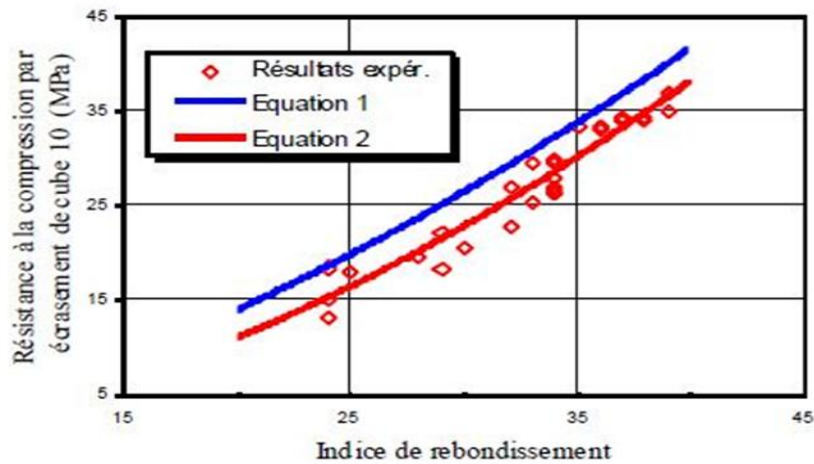
Sur la base des résultats individuels des éprouvettes, une corrélation est développée entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les indices de rebondissement «I» correspondants, qui sont effectués sur des spécimens conservés dans l'eau. Cette corrélation rassemblant les différents bétons prélevés sur divers sites et examinés à différents âges. L'expression proposée à cette corrélation est une fonction de forme puissance présentée par l'équation (1) avec un coefficient de corrélation  $r = 0.928$  et une erreur type  $s = 3.170$  MPa

$$R = 0.121 I^{1.583} \quad [1]$$

Une autre corrélation est élaborée entre les résistances à la compression «R» par écrasement des spécimens conservés dans l'eau et les indices de rebondissement «I» correspondants effectués sur des éléments d'ouvrages (**Fig. 1**). L'expression analytique proposée à cette corrélation est donnée par l'équation (2) avec un coefficient de corrélation  $r = 0.959$  et une erreur type  $s = 1.876$  MPa.

$$R = 0.049 I^{1.802} \quad [2]$$

La précision de l'estimation de la résistance par l'équation 2 pour un intervalle de confiance de 95% est:  $R$  (potentielle) =  $R$  (estimée)  $\pm 3.8$  MPa



**Figure III .1 :** Comparaison entre les deux courbes de corrélations développées sur éléments et sur éprouvettes

La figure III .1 montre que l'équation (1) surestime la résistance de l'ordre de 5 MPa par rapport à l'équation (2) développée à partir des essais effectués sur des éléments d'ouvrages. Idrissou [IDR 06] a aussi proposé deux corrélations différentes: l'une reliant les résistances avec les indices effectués sur des éprouvettes conservées à l'air et l'autre basée sur des résistances des carottes corrélées avec les indices effectués sur les poteaux à carotter. Il a conclu que la corrélation développée à partir des essais sur poteaux donne des résistances plus proches à la réalité comparativement à celle développée sur des éprouvettes.

- **Résultats d'essais à l'ultrason**

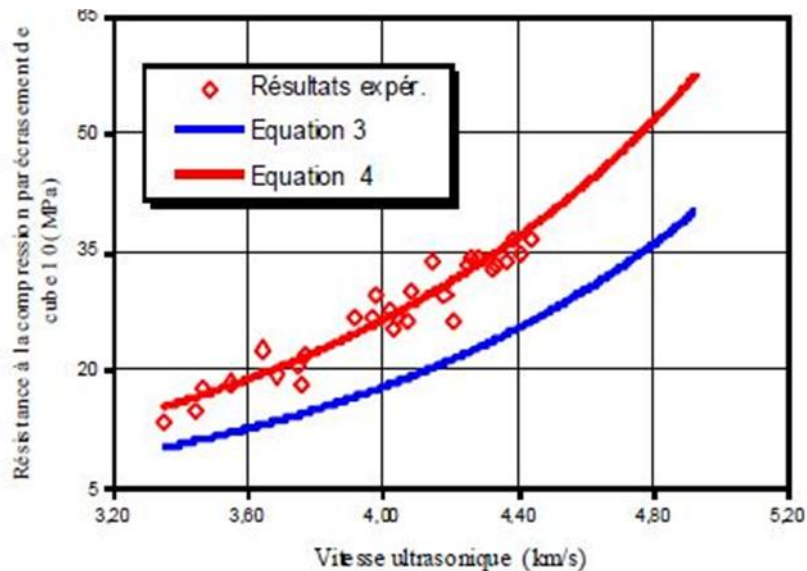
Sur la base des résultats individuels des éprouvettes, une corrélation est développée entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les vitesses ultrasoniques «V» correspondantes, qui sont effectuées sur des spécimens conservés dans l'eau. L'expression proposée à cette corrélation est une fonction de forme exponentielle présentée par l'équation (3) avec un coefficient de corrélation  $r = 0.924$  et une erreur type  $s = 2.651$  MPa.

$$R = 0.525 \exp(0.880 V) \quad [3]$$

Ainsi, une autre corrélation est élaborée entre les résistances à la compression «R» par écrasement des spécimens conservés dans l'eau et les vitesses ultrasoniques «V» correspondantes effectuées sur des éléments d'ouvrages. L'expression de cette est par l'équation (4) avec un coefficient de corrélation  $r = 0.954$  et une erreur type  $s = 2.156$  MPa.

$$R = 0.899 \exp(0.844 V) \quad [4]$$

La **figure III.2** présente une comparaison entre les corrélations (3) et (4). Il est très clair que l'équation (3) sous-estime la résistance à la compression. Il faut noter qu'Idrissou [IDR 06] a aussi proposé deux corrélations différentes: l'une reliant les résistances avec les vitesses effectuées sur des éprouvettes conservées à l'air et l'autre basée sur les résistances des carottes corrélées avec les vitesses effectuées sur les poteaux à carotter. Il a montré que la corrélation développée sur les poteaux donne des résistances plus proches à la réalité comparativement à celles développées sur les éprouvettes.



**Figure III.2** : Comparaison entre les deux courbes de corrélations développées sur élément et sur éprouvette

La corrélation la plus adaptée, pour estimer la résistance potentielle du béton dans l'ouvrage, est celle proposée de l'équation (4). La précision de l'estimation de la résistance par cette équation pour un intervalle de confiance de 95% est:

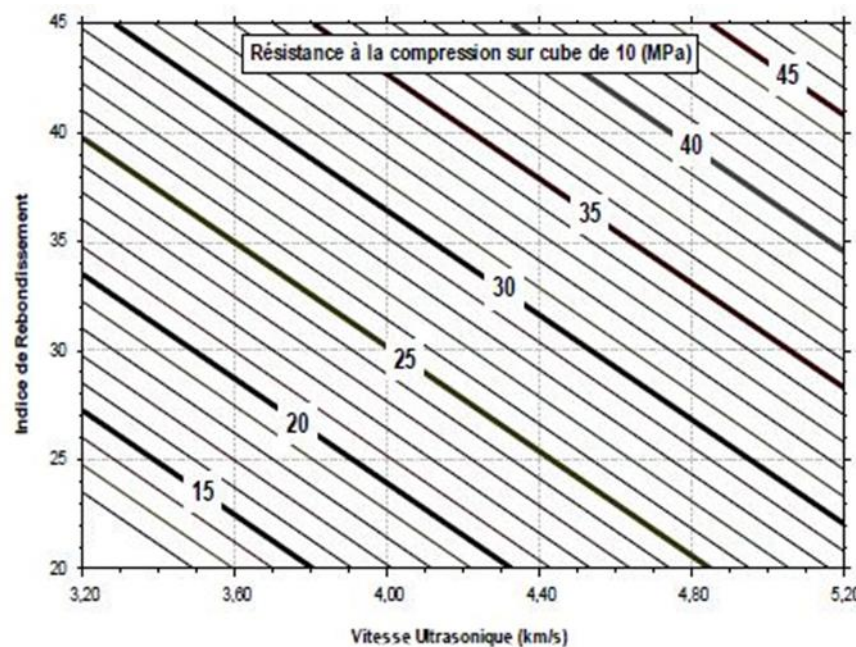
$$R \text{ (potentielle)} = R \text{ (estimée)} \pm 4.3 \text{ MPa.}$$

- **Résultats de la combinaison des deux essais ND**

La corrélation basée sur la combinaison des deux essais (scléromètre et ultrason) des spécimens conservés dans l'eau est présentée sous forme linéaire par l'équation (5). Cette corrélation ayant un coefficient de corrélation  $r = 0.968$  et une erreur type  $s = 1.746$  MPa

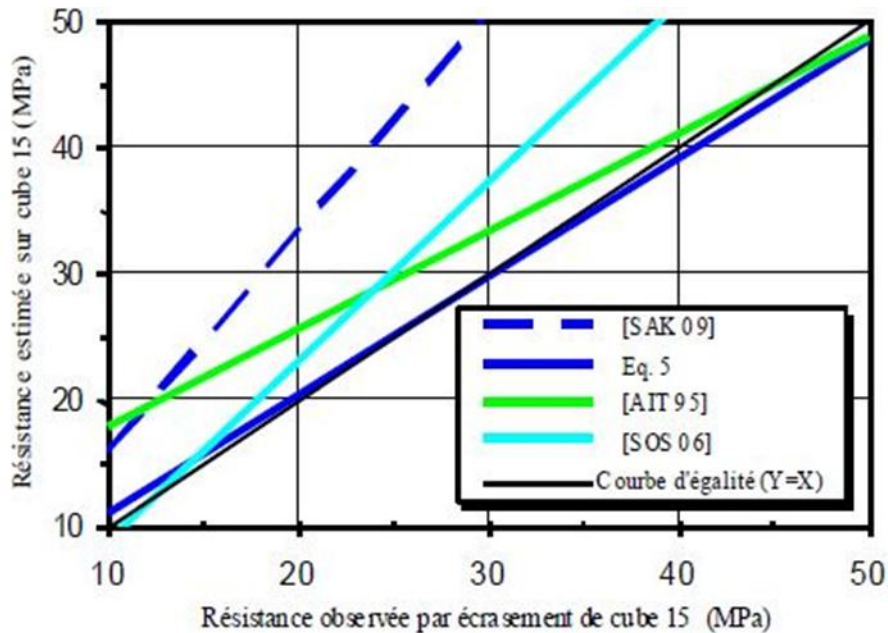
$$R = 9.576 V + 0.800 I - 37.436 \quad [5]$$

La corrélation par la méthode combinée (l'équation. 5) présente un coefficient de corrélation plus élevé et une erreur type faible comparativement à ceux du modèle uni paramétriques des équations (2) et (4). La même observation a été soulevée par d'autres chercheurs [HOB 07], [SOS 06]. Alors, l'utilisation de cette méthode par l'ingénieur de contrôle va lui permettre de mieux estimer la résistance potentielle du béton in situ et de la comparer à la résistance caractéristique requise. La représentation graphique de l'équation (5) est donnée sous forme d'un abaque par la **figure III.3**. La précision de l'estimation de la résistance avec un intervalle de confiance de 95% est:  $R$  (potentielle) =  $R$  (estimée)  $\pm 3.5$  MPa



**Figure III. 3** : Courbes de corrélation combinée entre résistance par écrasement des spécimens conservés dans l'eau et mesures non destructives sur élément d'ouvrage.

Une comparaison est montrée sur la **figure III. 4** entre la corrélation combinée de l'équation (5) proposée dans le cadre de cette étude et d'autres corrélations combinées des équations proposées par d'autres chercheurs. L'effet d'échelle des éprouvettes a été pris en considération. On constate que la courbe de l'équation (5) du modèle proposé par cette étude est très voisine à la courbe d'égalité ( $Y=X$ ). Ce qui montre que notre modèle présente une grande précision dans l'estimation de la résistance, par contre les autres modèles généralement surestiment la résistance;



**Figure III. 4 :** Comparaison entre la résistance observée par écrasement et celles estimées par différents modèles combinés établis par plusieurs auteurs..

### III.2 Le contrôle non destructif des ouvrages en béton « évaluation de la résistance du béton à la compression sur site : application de la méthode combinée » [H.S][G.M/N]

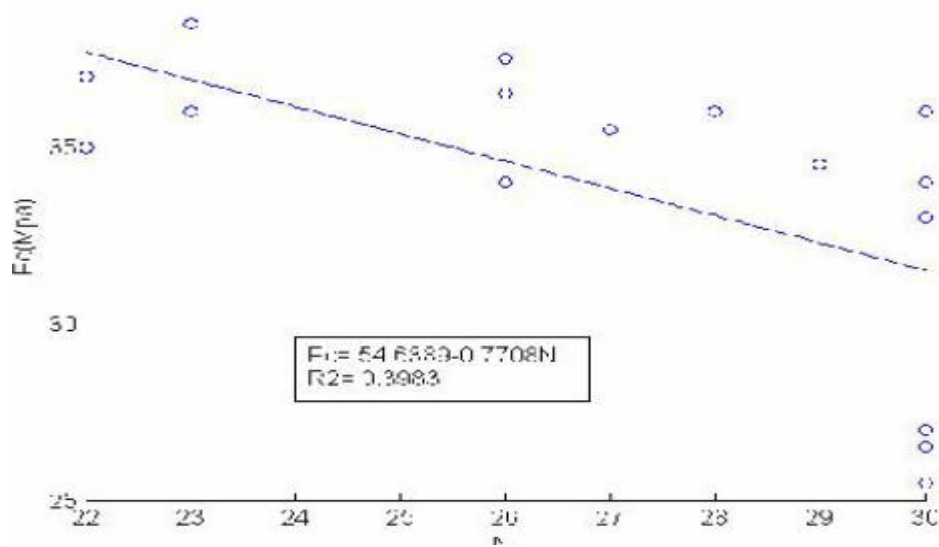
#### ➤ S. HANNACHI, M.N. GUETTACHE

Pour pallier à des résultats erronés et améliorer la fiabilité de l'estimation de la résistance à la compression par le contrôle non destructif, il est indispensable de calibrer les valeurs des mesures issues des deux essais (scléromètre + ultrasons).

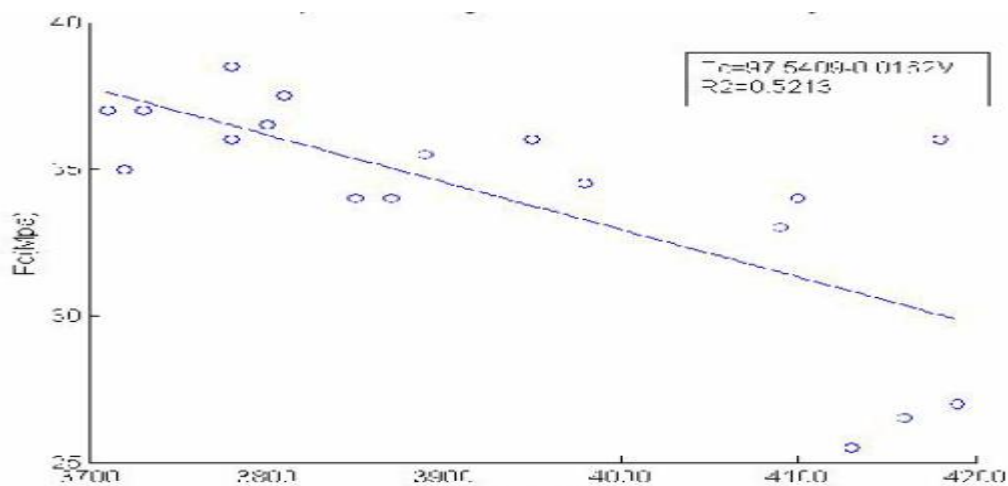
L'analyse statistique semble être le moyen incontournable pour interpréter les données observées ; l'utilisation des résultats des essais mécaniques sur éprouvettes et carottes est nécessaire pour pouvoir calibrer ces essais. Dans cette étude ; des relations de corrélation entre les résultats des essais mécaniques des éprouvettes et des carottes et celles issues du contrôle non destructif (scléromètre et ultrasons) sont établies, les valeurs sont plotées dans des graphes, Matlab est utilisé pour extraire les courbes de tendance (courbe de régression) et les: coefficients de détermination  $R^2$  sont déterminés pour chaque courbe de régression.

Les résultats des corrélations sont résumés dans les **tableaux III.1 et III.2**.

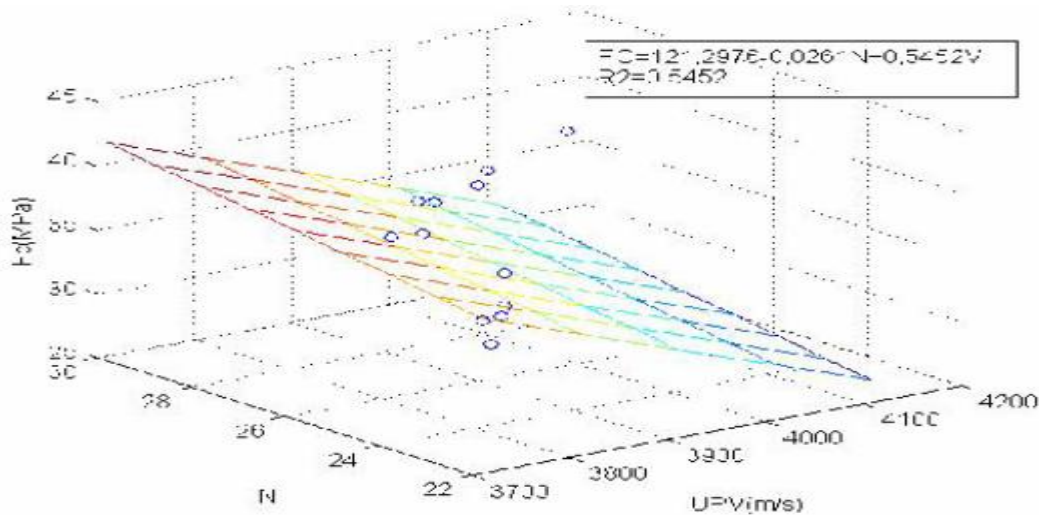
En parallèle de l'analyse statistique; d'autres procédures sont nécessaires pour analyser les résultats des corrélations ; des normes et des spécifications sont développées, aucune n'a obtenu le consensus tant espéré.



**Figure III.5 :** Corrélation entre indice sclérométrique et résistance en compression pour éprouvettes.



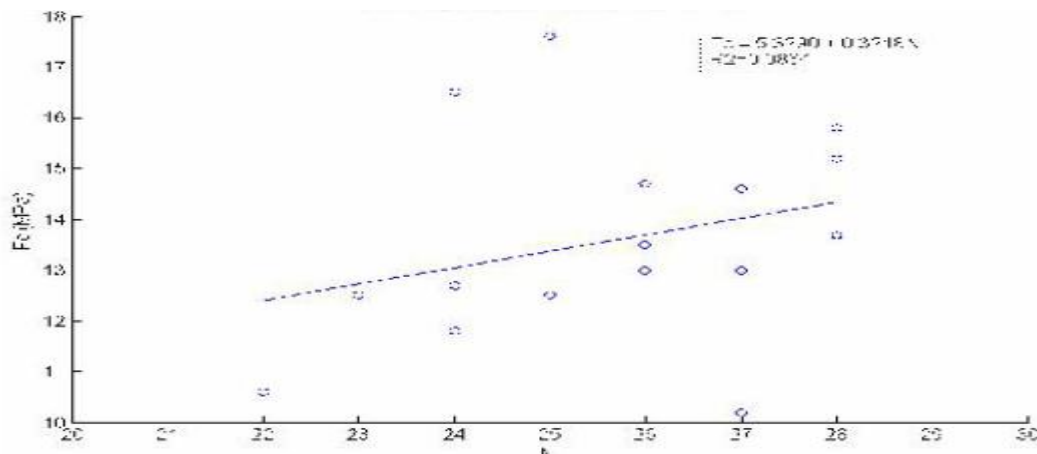
**Figure III.6 :** Corrélation entre vitesse ultrasonique et résistance en compression pour éprouvettes.



**Figure III.7:** Corrélation entre vitesse ultrasonique, indice sclérométrique et résistance en compression pour éprouvettes.

**Tableau III.1 :** Résultats des régressions pour éprouvettes.

Equations de corrélations et coefficient de détermination des régressions-résistance compression éprouvettes		
Indice scléromètre N	$F_c = -0.7708N + 54.6389$	$R^2 = 0.3983$
Vitesse ultrasonique V	$F_c = -0.0162V + 97.54095$	$R^2 = 0.5213$
Méthode combinée	$F_c = -0.5752V - 0.0261N + 121.2976$	$R^2 = 0.5452$



**Figure III.8 :** Corrélation entre indice sclérométrique et résistance en compression des carottes

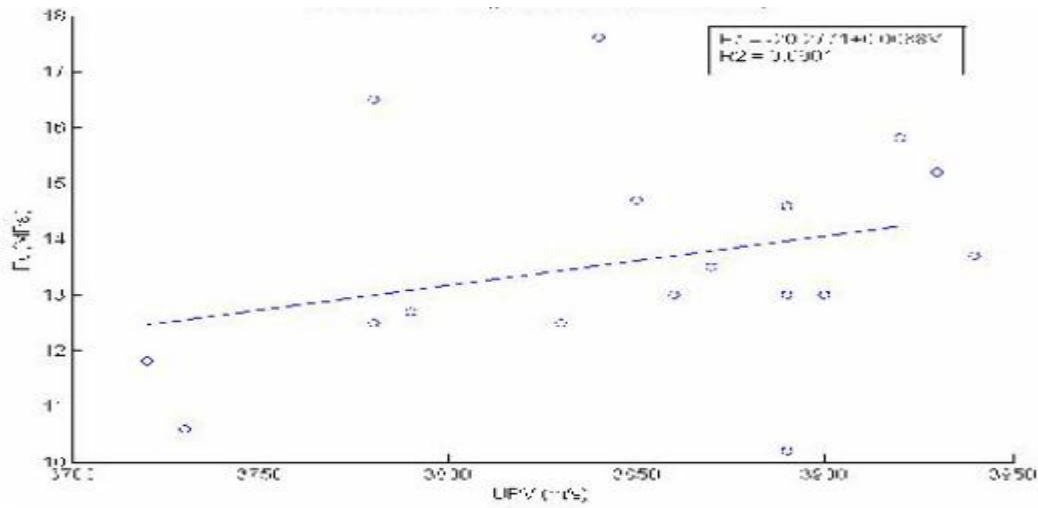


Figure III.9: Corrélation entre vitesse ultrasonore et résistance en compression carotte.

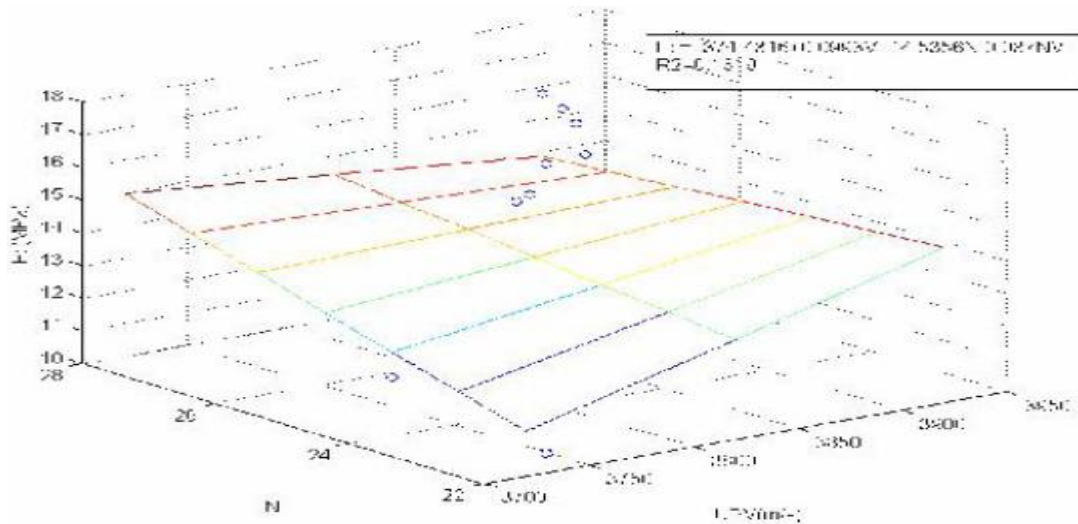


Figure III.10: Corrélation entre vitesse ultrasonique, indice scléromètre et résistance en compression carotte

Tableau III.2: Résultats des régressions – carotte

Equations de corrélations et coefficient de détermination des régressions-résistance compression éprouvettes		
Indice scléromètre N	$F_c = 0.3218N + 5.3290$	$R^2 = 0.0864$
Vitesse ultrasonique V	$F_c = 0.0088V - 20.2771$	$R^2 = 0.0901$
Méthode combinée	$F_c = 0.0993V + 14.5356N - 0.0037NV - 371.4$	$R^2 = 0.1251$



### III.3 Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre et Ultrason) [B.DJ]

#### ➤ DJAMILA BOUKHELKHAL et SAID KENAI

Les corrélations proposées dans cette étude sont développées sur l'ensemble des différents bétons testés à différents âges. Pour trouver l'équation de régression qui s'applique le mieux à la détermination de la résistance du béton à l'aide des équations uniparamétriques exprimant les rapports  $R_c = f(I)$  et  $R_c = f(V)$  ou à l'aide des équations de corrélation multiples  $R = f(I, V)$ , on a eu recours au coefficient de corrélation « r » et l'erreur type « s » avec :

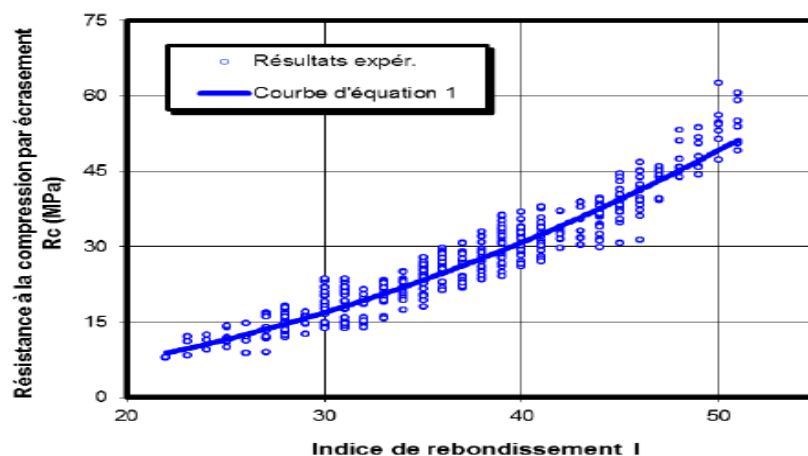
- $R_c$  : résistance à la compression par écrasement,
- $I$  : indice de rebondissement,
- $V$  : vitesse ultrasonique.

#### \* Corrélation uni paramétrique entre la résistance et l'indice de rebondissement

La figure III.11 présente la corrélation établie entre les mesures de la résistance à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme puissance présentée par l'équation 1 avec un coefficient de corrélation  $r = 0,957$  et une erreur type  $s = 3,121$  MPa.

$$R = 0,013I^{2,112} \quad [1]$$

Avec :  $R$  en MPa



**Figure III.11 :** Corrélation Résistance à la compression – Indice de rebondissement.

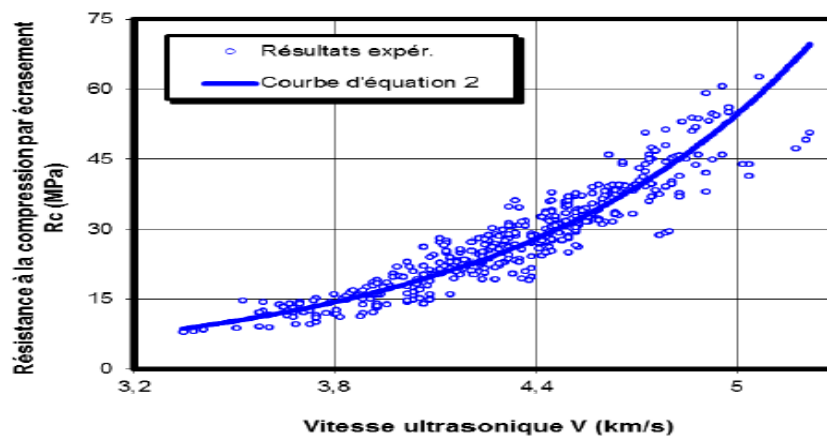
D'après cette figure, on peut conclure qu'il existe une bonne corrélation ( $r = 0,957$ ) entre les résistances à la compression par écrasement et les indices de rebondissement correspondants pour l'ensemble des bétons. A cet effet, on peut dire que les résultats trouvés par le scléromètre convergent bien vers ceux trouvés par écrasement direct.

- **Corrélation uniparamétrique entre la résistance et la vitesse ultrasonique**

La figure III.12, présente la courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement «Rc» et les vitesses ultrasoniques «V» correspondants. L'expression proposée à cette corrélation est une relation de forme exponentielle présentée par l'équation 2 avec un coefficient de corrélation  $r = 0,926$  et une erreur type  $s = 4,063$  MPa.

$$R = 0,342 \exp (1,004 V) \quad [2]$$

Avec R en MPa et V en km/s.



**Figure III.12 :** Corrélation Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique.

D'après la figure III.12, on peut dire qu'il existe une bonne corrélation entre les résistances à la compression par écrasement et les vitesses ultrasoniques correspondantes pour l'ensemble des différents bétons examinés.

- **Corrélation combinée entre la résistance à la compression, l'indice de rebondissement et la vitesse ultrasonique**

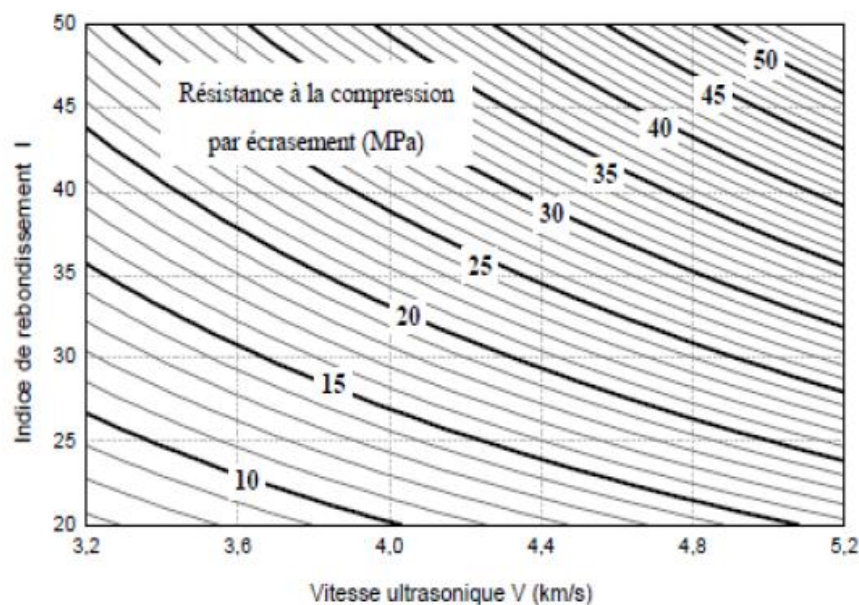
Dans la figure III.13, on présente une courbe de corrélation combinée élaborée entre les résistances à la compression par écrasement «R» et les mesures d'auscultations correspondantes (indices de rebondissement «I» et vitesses ultrasoniques «V»). L'expression analytique proposée à cette corrélation, en utilisant la régression multiple, est une fonction de

forme puissance présentée par l'équation 3 avec un coefficient de corrélation  $r = 0,970$  et une erreur type  $s = 2,620$  MPa.

$$R = 0,013 \times V^{1,756} \times I^{1,401} \quad [3]$$

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

On remarque que la corrélation par la méthode combinée présente un coefficient de corrélation plus élevé et une erreur type moins élevée comparativement à ceux des modèles uniparamétriques des équations 1 et 2. La même observation a été soulevée par d'autres chercheurs [Ga, 03 ; Ke, 03 ; Kh, 10 ; Le, 97].



**Figure III.13** : Corrélation combinée entre la résistance à la compression par écrasement et les mesures non destructives (Indice sclérométrique et Vitesse ultrasonique).

- **Etude Comparative aux modèles proposés dans la littérature**

On présente sur les figures III.13 – III.16, des études comparatives entre les différents modèles de corrélation proposés dans la littérature par différents chercheurs pour des bétons de site et celui établi dans cette étude d'équation 1–3 respectivement.

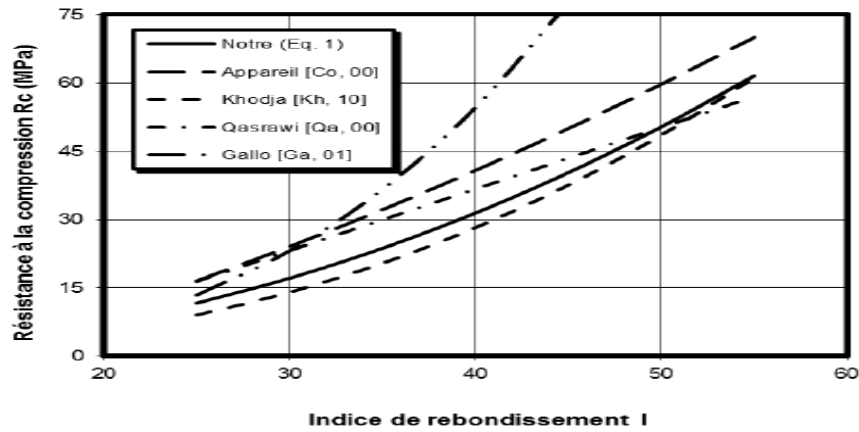


Figure III.14 : Corrélations Résistance à la compression – Indice de rebondissement établies par divers auteurs.

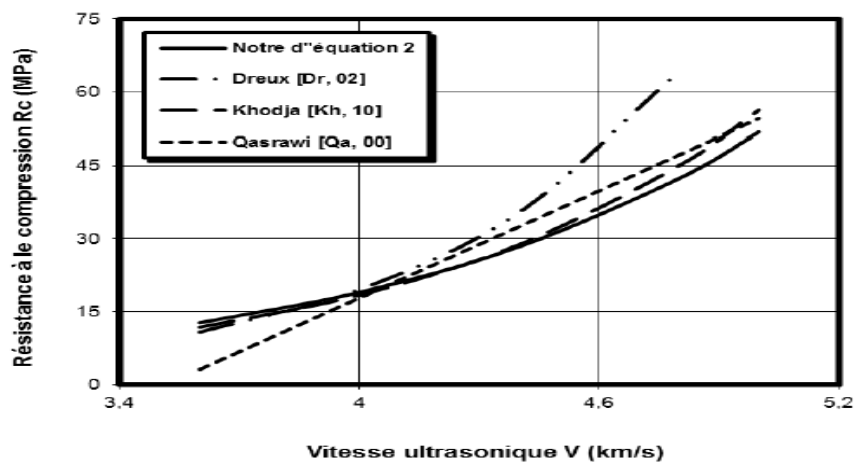


Figure III.15 Corrélations Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique établies par divers auteurs.

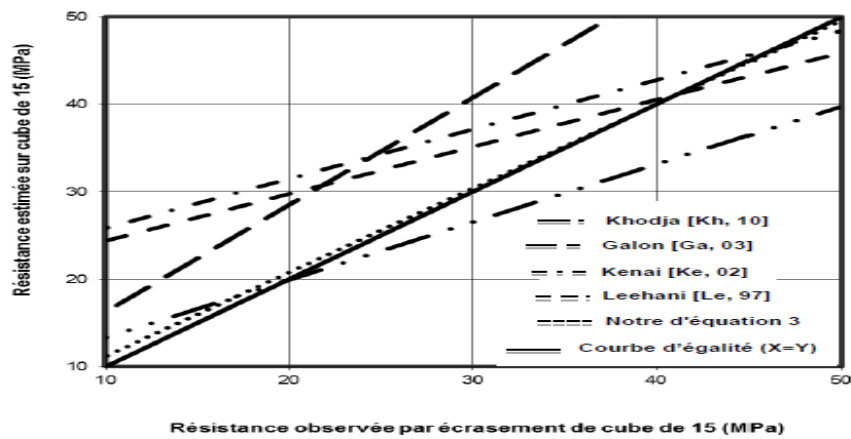


Figure III.16 : Comparaison entre la résistance par écrasement et celles estimées par différents modèles combinés établies par divers auteurs.

**III.4 Travaux réalisés au sein de l’université de Guelma :**

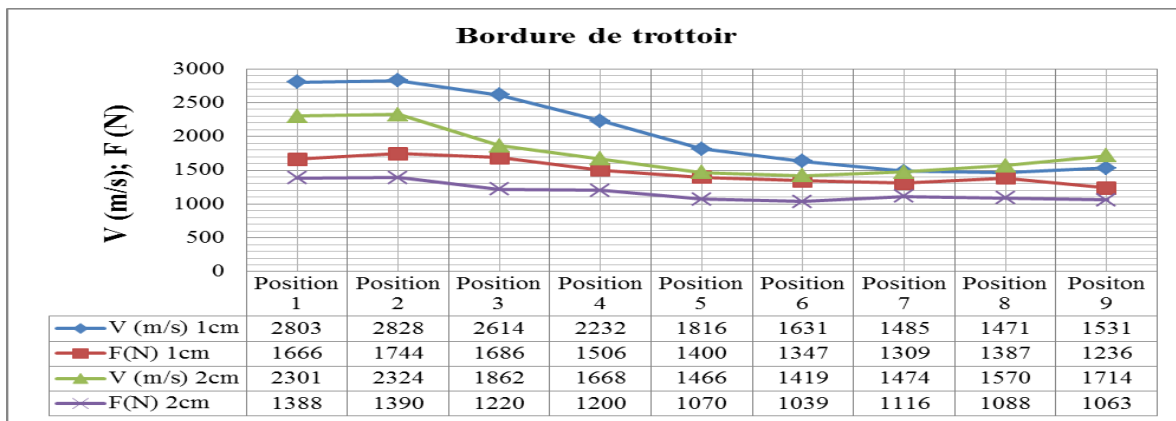
**III.4.1 Caractérisation de l’adhérence des mortiers avec différents supports [S.K][H.K][K.N]**

➤ **SAKLOUL KAMEL, HANNACHI KHEIRREDINE et KHALDI NACERA**

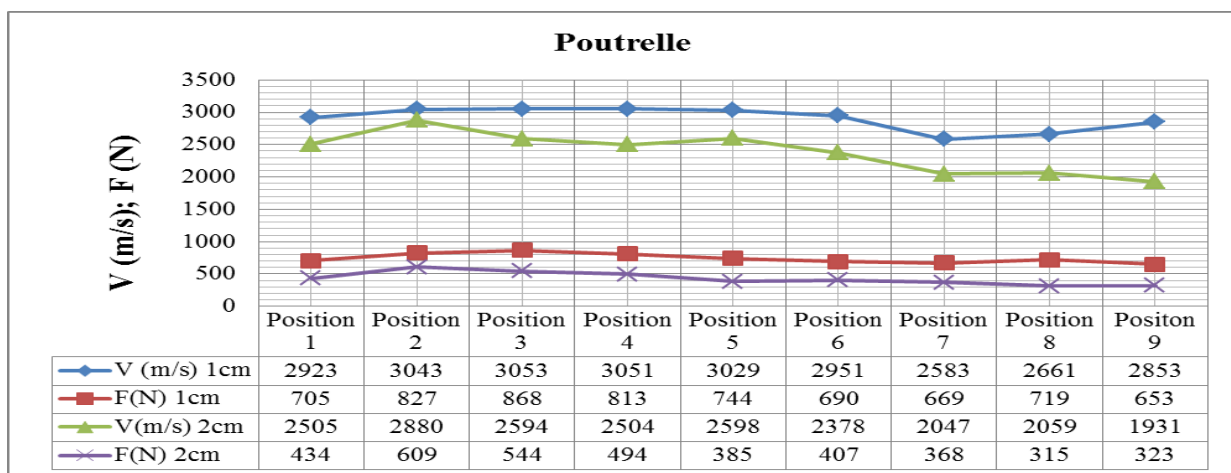
A partir des résultats des essais expérimentaux, nous avons établi une relation entre les différents paramètres étudiés ; à savoir :

**\* Corrélation entre les vitesses ultrasonique et les forces d’arrachement :**

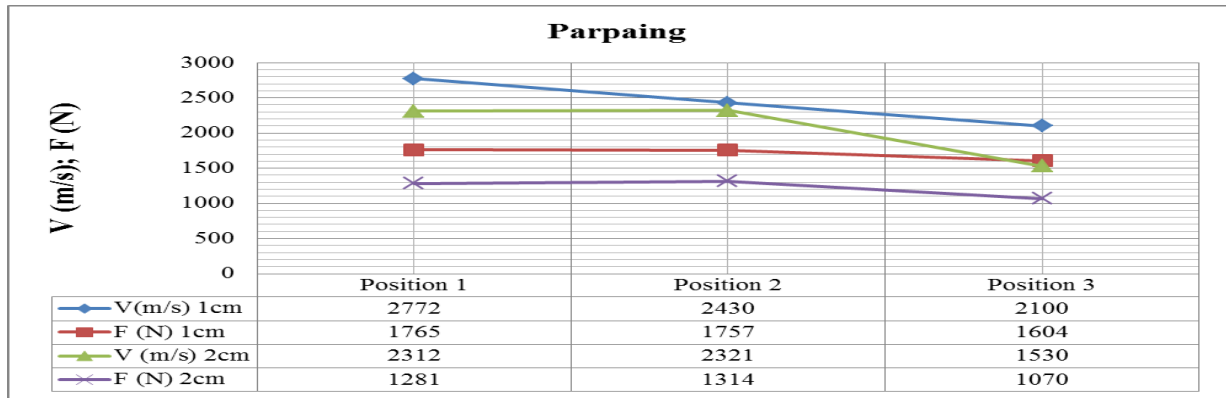
**Pour le mortier de ciment :**



**Figure III.17 :** Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d’arrachement pour les bordures de trottoir revêtues par le mortier de ciment (ép. 1 cm et 2 cm).

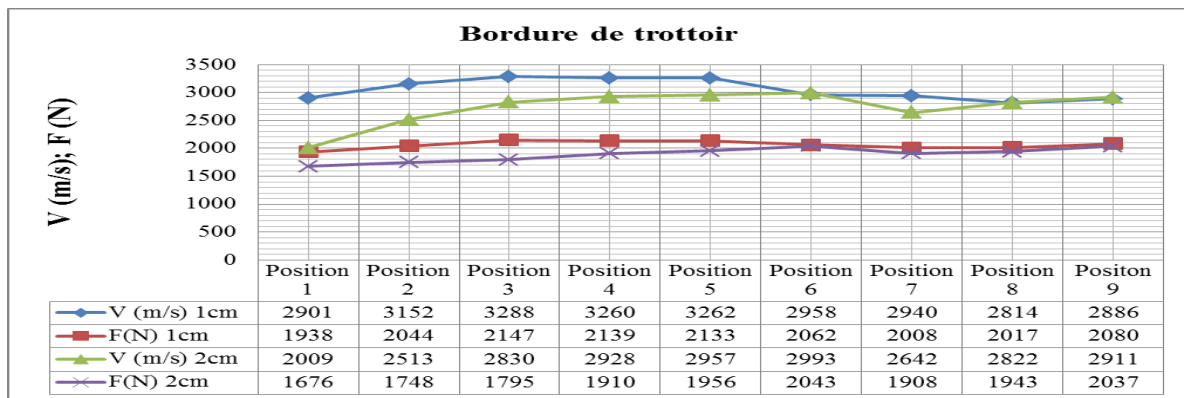


**Figure III.18:** Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d’arrachement pour les poutrelles revêtues par le mortier de ciment (ép. 1 cm et 2 cm).

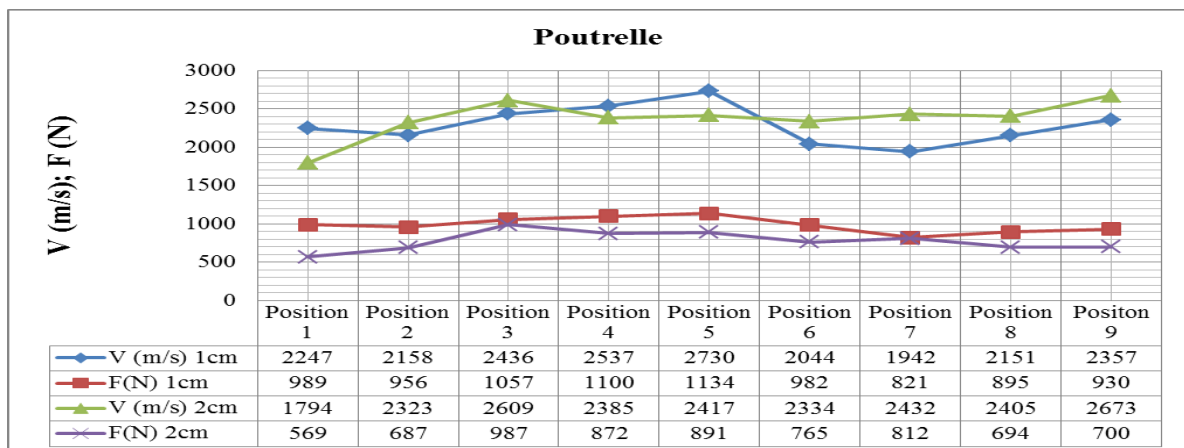


**Figure III.19 :** Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les parpaings revêtus par le mortier de ciment (ép. 1 cm et 2 cm).

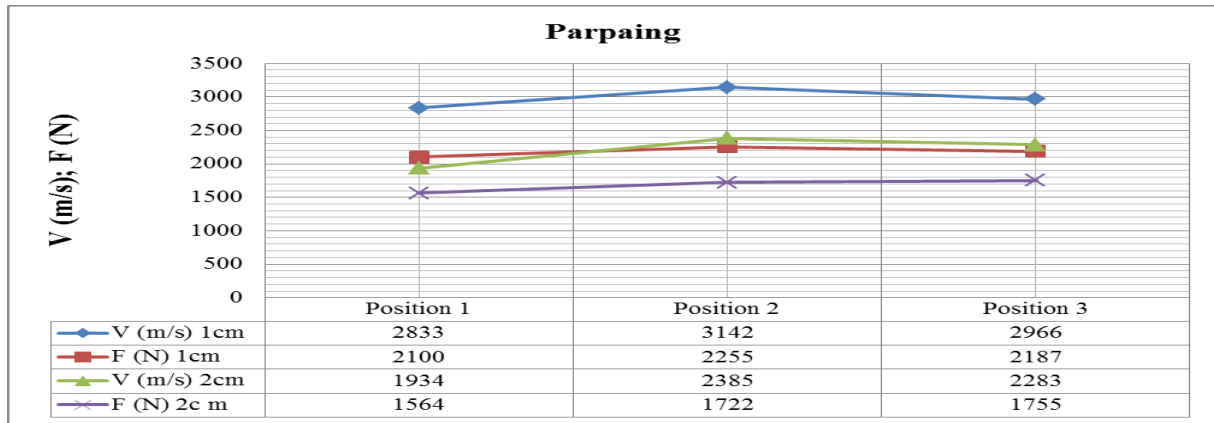
**Pour le mortier prêt à l'emploi :**



**Figure III.20:** Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les bordures de trottoir revêtues par le mortier prêt à l'emploi (ép. 1 cm et 2 cm).



**Figure III.21:** Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les poutrelles revêtues par le mortier prêt à l'emploi (ép. 1 cm et 2 cm).



**Figure III.22:** Relation entre les vitesses des ultrasons et les forces d'arrachement pour les parpaings revêtus par le mortier prêt à l'emploi (ép. 1 cm et 2 cm).

### III.4.2 Contrôle du béton par des essais non destructifs [M.A] [K.N]

➤ **MEHAMDIA ALI et KHALDI NACERA**

Ce travail s'intéresse à la comparaison des résistances du béton dans différents âges pour les deux formes d'éprouvettes (cylindrique et cubique) déterminées avec les trois méthodes (ultrason, scléromètre et la presse).

Les résultats obtenus sont regroupés dans les tableaux qui suivent :

**Tableaux III.3:** Variation de la résistance (MPa) en fonction de l'âge du béton selon les différentes méthodes utilisées

**- Les éprouvettes cylindriques**

**B 1**

méthodes \ Temps (jours)	Temps (jours)		
	7	14	28
Scléromètre	13.56	18.43	27.40
Presse	12.04	15.53	18.88
ultrason	17.88	20.34	21.08

**B 2**

Temps (jours) méthodes	7	14	28
Scléromètre	19.63	24.75	30.50
Presse	13.37	15.66	21.02
ultrason	17.83	20.35	21.14

**B 3**

Temps (jours) méthodes	7	14	28
Scléromètre	15.37	15.89	26.06
Presse	18.51	20.43	24.04
ultrason	21.13	21.35	22.48

A la lecture de ces trois tableaux, on peut remarquer que :

- Les résistances déterminées par écrasement sont toujours inférieures à celles déterminées par scléromètre et ultrason.
- Les résistances à 07 jours et 14 jours, déterminées par ultrason sont supérieures à celles déterminées par scléromètre et par la presse.
- Les résistances à 28 jours sont plus proches avec une légère augmentation dans le cas du scléromètre. Ce qui reflète que l'essai au scléromètre est plus adopté au cas des bétons durcis.
- Les résultats des résistances obtenues par la presse et ultrason se rapprochent à l'âge de 28 jours.



**- Les éprouvettes cubiques****B 1**

Temps (jours) méthodes	7	14	28
Scléromètre	14.43	14.70	13.75
Presse	5.76	7.57	10.18
ultrason	20.55	19.93	19.58

**B 2**

Temps (jours) méthodes	7	14	28
Scléromètre	14.68	13.60	13.45
Presse	5.62	6.65	6.66
ultrason	20.24	19.34	18.24

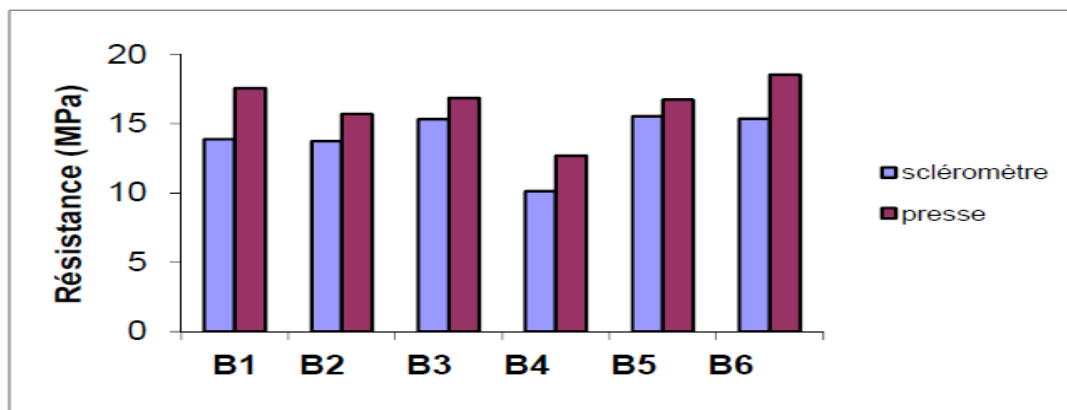
A la lecture de ces deux tableaux, on peut remarquer que :

- Les résistances déterminées par écrasement dans les différents âges de durcissement sont toujours inférieures à celles déterminées par scléromètre et ultrason.
- Les résistances déterminées par ultrason sont toujours supérieures à celles déterminées par scléromètre et par la presse pour les différents âges du béton.
- Les valeurs des résistances obtenues par scléromètre et ultrason prennent une forme décroissante après l'âge de 07 jours.
- Les résultats des résistances déterminées par la presse sont très faibles dans les différents âges du béton et prennent une forme croissante après l'âge de 07 jours avec une légère augmentation.

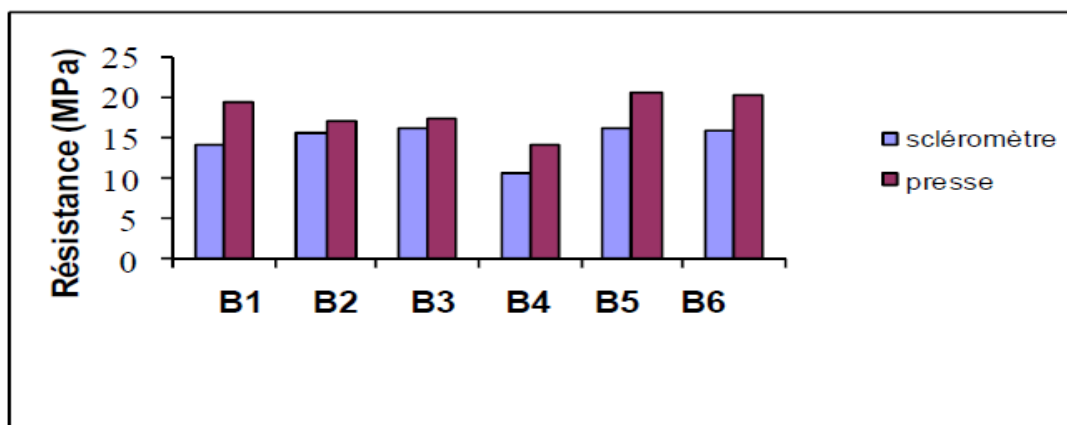
### III.4.3 Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre : influence de la composition [B.A]

➤ **BENOUIS A/HALIM et all**

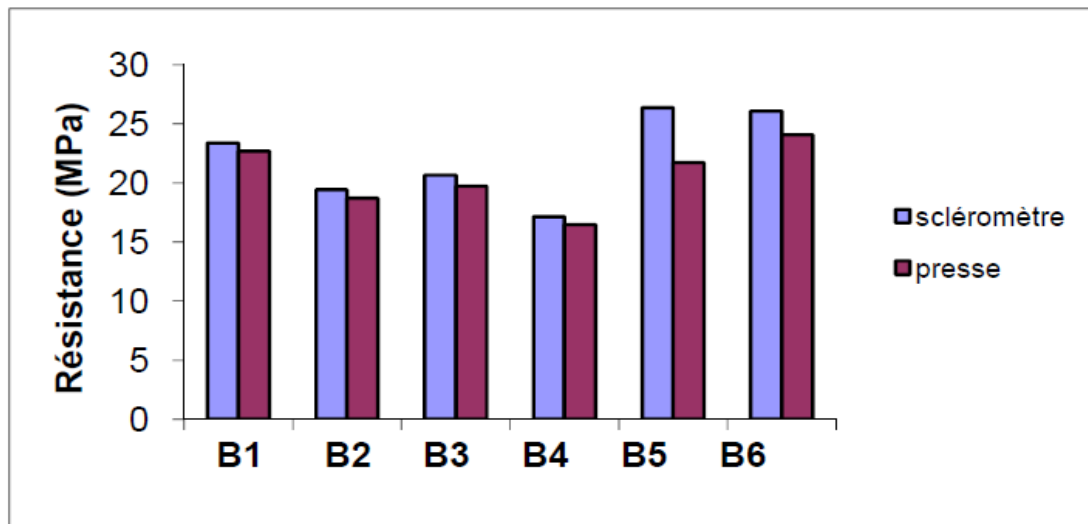
Les Figures III.23 à III.25 montrent l'ensemble des correspondances des résultats des essais destructifs et non destructifs aux différents âges. Si pour l'ensemble des compositions, les résistances aux deux premières semaines déterminées par écrasement sont supérieures à celles déterminées par le scléromètre avec une différence maximale de 27 % à 7 jours et 36 % à 14 jours pour le béton B1, cette relation s'inverse pour les bétons plus âgés (28 jours) où la diminution peut atteindre les 17 % pour le béton B5. Toutefois les valeurs moyennes des variations des résistances déterminées par ces deux méthodes sont de 17 %, 24 % et 7 % respectivement à 7, 14 et 28 jours. On note une augmentation pour les deux premiers âges et une diminution à 28 jours, toutefois ces variations diminuent avec le mûrissement du béton.



**Figure III.23** : Résistances des bétons à 7 jours

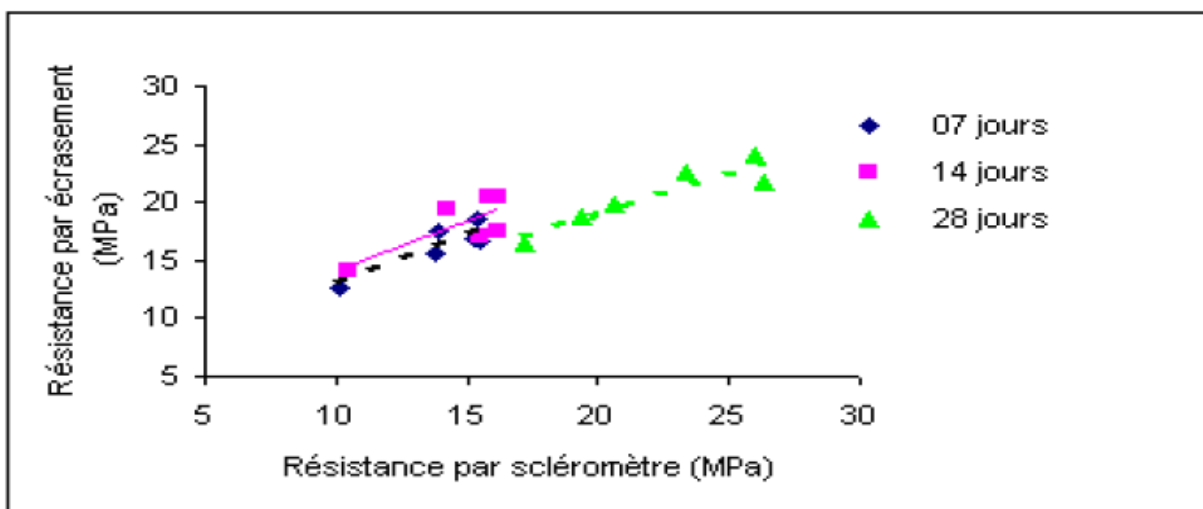


**Figure III.24** : Résistances des bétons à 14 jours



**Figure III.25 :** Résistances des bétons à 28 jours

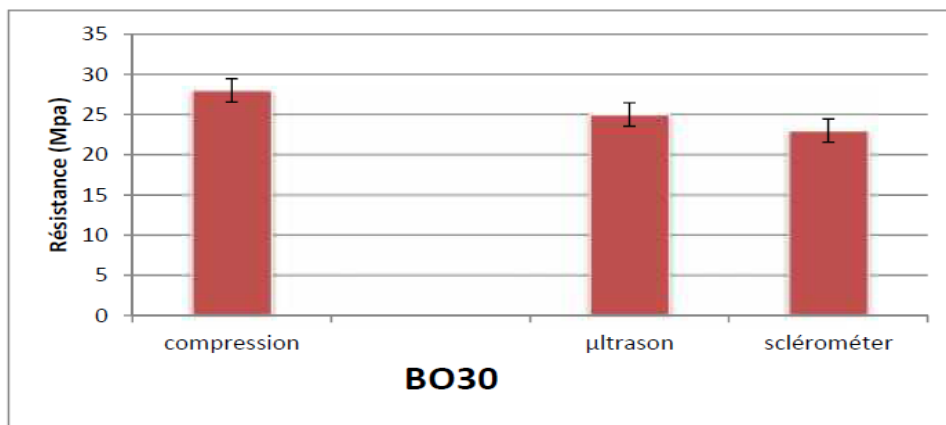
La **Figure III.26** montre les relations entre les deux résistances de l'ensemble des bétons aux différents âges. On note que pour les trois âges des bétons la relation est de type linéaire. Les fonctions de lissage des âges 7 et 14 jours sont assez proches tandis qu'à 28 jours on note une certaine différence. Cependant, on remarque qu'à 28 jours la fonction de lissage présente un coefficient de détermination  $R^2$  proche de l'unité. Les essais sclérométriques ne peuvent se substituer aux essais pour la détermination de la résistance du béton à la compression peuvent, cependant, fournir une meilleure estimation pour les bétons âgés plutôt que pour les bétons jeunes.



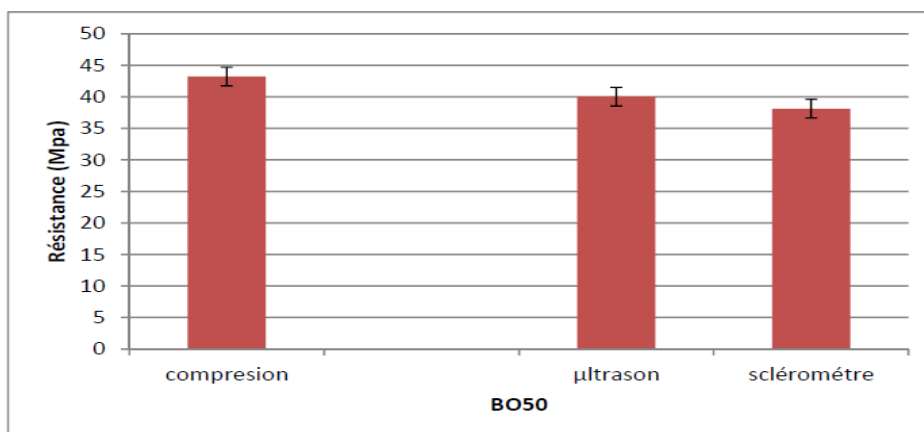
**Figure III.26 :** Relations entre les résistances par scléromètre et par écrasement.

**III.5 Travaux réalisés au sein de l'université de Constantine :****III .5.1 Bases expérimentales pour l'établissement d'une corrélation entre les essais destructif et non destructif « cas d'un béton ordinaire » [F.Y][H.O]****➤ FENINECHE YAAKOUB et HEMMOUDA OUSSAMA et ALL****• Sur les éprouvettes :**

Cette partie de travail étudie l'influence de la modification du rapport E/C sur quelques propriétés à l'état durci, à savoir : la résistance à la compression, la vitesse de pulsation des ultrasons et la dureté de la surface (scléromètre).



**Figure III.27 :** Les résultats des éprouvettes (BO30) obtenus à partir d'essai destructifs et non destructifs.



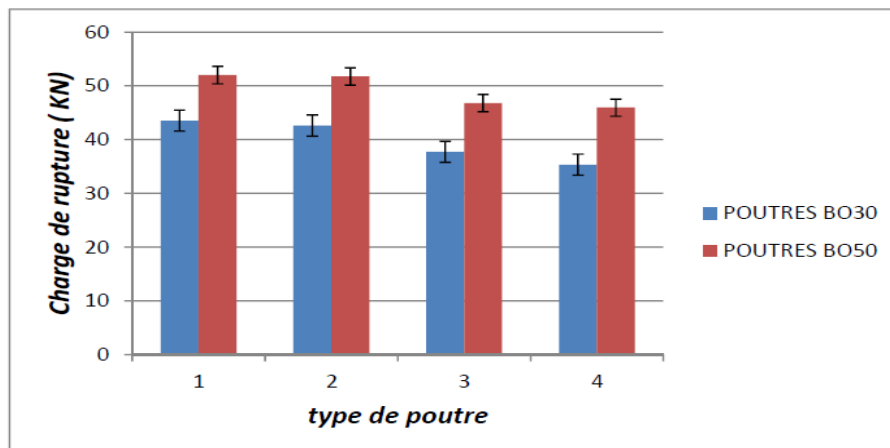
**Figure III.28 :** Les résultats des éprouvettes (BO50) obtenus à partir d'essai destructifs et non destructifs.

Nous remarquons que l'essai de la compression donne des résistances plus grandes que les essais non destructifs ultrason et scléromètre.

Dans les éprouvettes de BO50, La rupture peut être assez brutale, dans les autres cas l'éprouvette rompt par 'affaissement' sur elle-même. Dans ce type de rupture, 2 cônes apparaissent aux extrémités (diabolos) de l'éprouvette rompue. La pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec l'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone. Dans la partie centrale, la déformation transversale est libre; elle résulte des contraintes de traction perpendiculaires à la compression (et à la fissuration). Ce sont ces contraintes de traction qui provoquent la fissuration longitudinale de l'éprouvette ainsi que sa ruine en partie centrale, alors que les extrémités protégées par le frettage créé par les plateaux de la presse ne sont pas détruites.

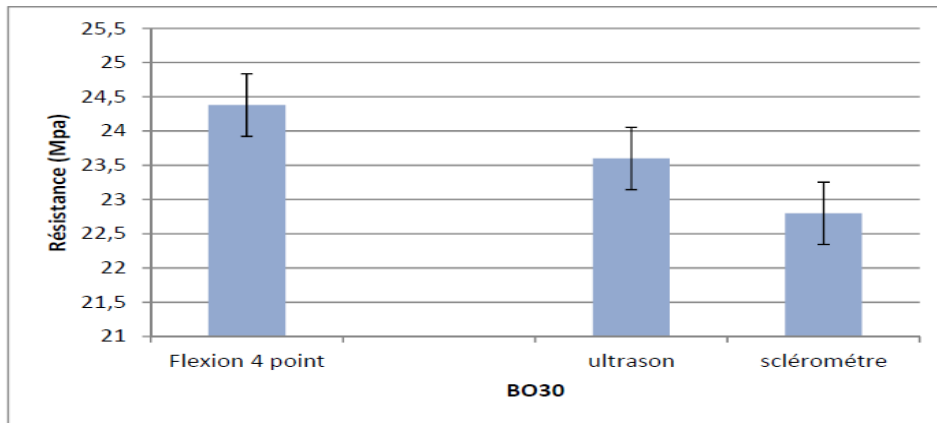
- **Sur les poutres :**

Cette partie explique l'influence de l'espacement de l'armature transversale et le diamètre utilisé par les deux méthodes destructives et non destructives

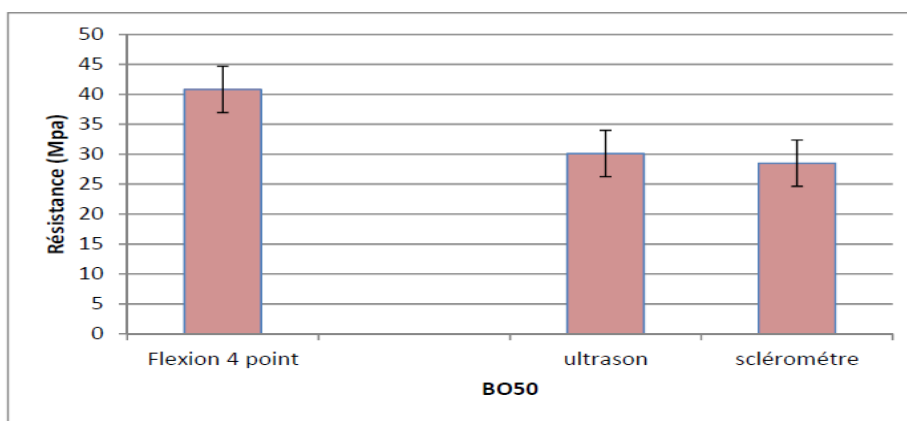


**Figure III.29 :** Charge de rupture des poutres en (BO30) et(BO50).

On remarque à partir de la comparaison des poutres BO30 avec BO50 que la charge de rupture de BO50 est plus grande que le BO30 parce que le comportement des poutres est différent.



**Figure III.30:** Résultats d'essai non destructif par rapport aux destructif (BO30).



**Figure III.31 :** Résultats d'essai non destructif par rapport aux destructif (BO50).

Nous remarquons une différence entre les résultats des essais non destructifs (ultrason et scléromètre) par rapport à l'essai destructif (flexion 4 points).

Cette différence est due à plusieurs paramètres qui influent sur les essais non destructifs.

Pour le SCLEROMETRE : Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de la section, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats, l'Homogénéité du béton, La tête du marteau doit toujours être positionnée de façon perpendiculaire à la surface du béton, vibration, dureté de la surface sur laquelle frappe la masse, la rugosité de surface.

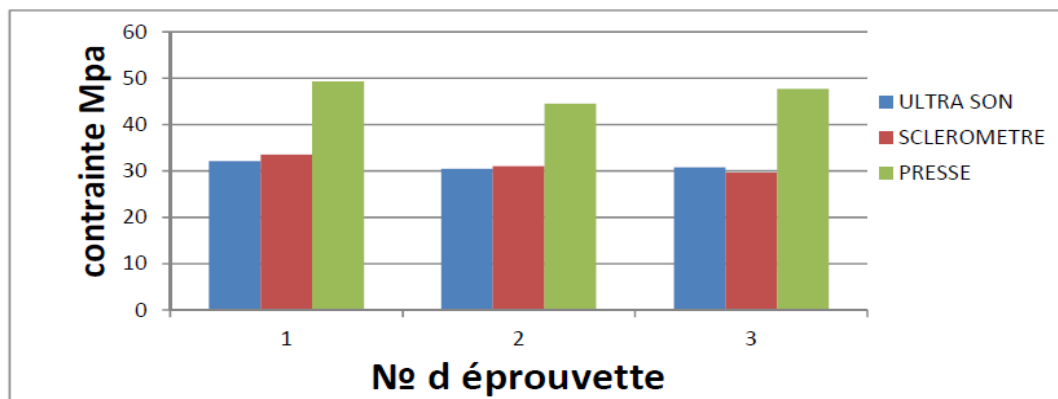
Pour l'ULTRASON : Les résultats sont influencés par des facteurs tels que, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures, la rugosité de surface, Les vides à l'intérieur du béton.

### III.5.2 Bases expérimentales pour l'établissement d'une corrélation entre les essais destructifs et non destructifs : cas du béton autoplaçant [K.F][B.H]

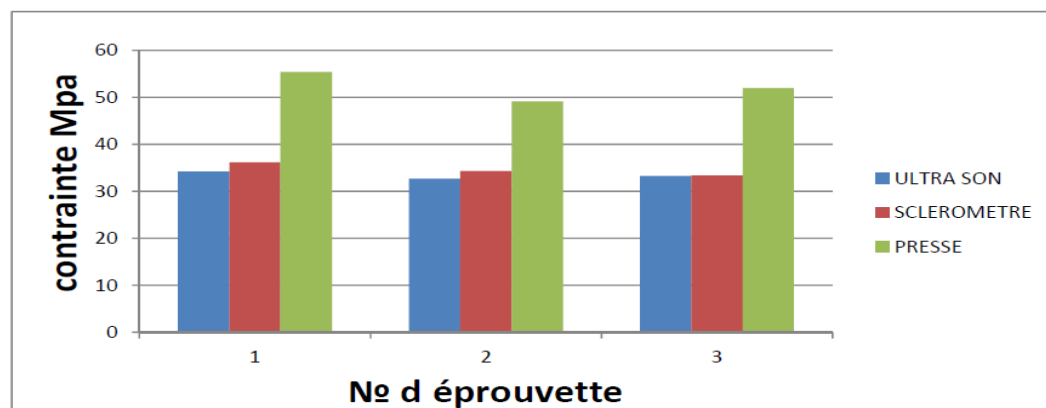
- **KERROUCHI FAYCEL et BOUKOUS HOUSSAMEDDINE et all**
  - **Résultats des Essai de résistance à la compression et essai non destructif (scléromètre, ultrason) :**

Nous avons coulé 03 éprouvettes pour chaque mélange de béton, l'écrasement de ces éprouvettes et l'essai non destructif a été fait à 28 jours.

- ❖ Les résultats obtenus sont présentés sur la figure suivante :



**Figure III.32:** Comparaison entre les résultats de l'essai de compressions et les essais ND mélange No 01.



**Figure III.33 :** Comparaison entre les résultats de l'essai de compressions et les essais ND mélange No 02.

- Nous remarquons que les résultats non destructifs sont similaires (scléromètre, ultrason) (**Figure III.32**) par contre le résultat donné par l'essai de compression sont plus importants dans le premier gâchis par rapport au scléromètre 34% et ultra son 35 %.

Pour le deuxième gâchis le pourcentage est de 33% et 36% respectaient par rapport au scléromètre et l'ultrason voir **Figure III.33**.

Nous remarquons que l'essai de compression donne des résistances plus grandes que les essais non destructifs ultrason et scléromètre.

Dans les éprouvettes de mélange 02, La rupture peut être assez brutale, dans les autres cas l'éprouvette rompt par « L'étalement » sur elle-même. Dans ce type de rupture, 2 cônes apparaissent aux extrémités (diabolos) de l'éprouvette rompue. La pression exercée par les plateaux de la presse à la jonction avec L'éprouvette gêne les déformations transversales dans cette zone. Dans la partie centrale, la déformation transversale est libre; elle résulte des contraintes de traction perpendiculaires à la compression (et à la fissuration). Ce sont ces contraintes de traction qui provoquent la fissuration longitudinale de l'éprouvette ainsi que sa ruine en partie centrale, alors que les extrémités protégées par le freinage créé par les plateaux de la presse ne sont pas détruites.

### **III.6 Travaux réalisés au sein de l'université d'Annaba :**

#### **III.6.1 L'utilisation de la Technique Ultrasonique dans le cas de Béton Recyclé [A.S]**

- **AYOUB SOUAD et all**
- **Les résultats d'essai non destructif :**

Le tableau III.4 présente la mesure de temps de propagation du son dans deux faces des 33 éprouvettes cubiques (10\*10\*10) cm<sup>3</sup>. A partir de temps mesuré on a calculé la vitesse de son pour chaque éprouvette. Le tableau suivant présente les résultats :



**Tableau III.4:** Calcul de la vitesse de son de dosage 350 Kg/m<sup>3</sup>

Dosage (Kg/m <sup>3</sup> )	Distance (m)	V <sub>1</sub> (m/s)	V <sub>2</sub> (m/s)	V <sub>Moy</sub> (m/s)	V <sub>Moy</sub> (m/s)
00-350-01	0.1	4425	4629	4527	4481
00-350-02	0.1	4348	4311	4329	
00-350-04	0.1	4545	4630	4587	
25-350-01	0.1	4219	4310	4264	4174
25-350-03	0.1	4166	4166	4166	
25-350-04	0.1	4132	4049	4090	
50-350-01	0.1	4219	4274	4246	4262
50-350-03	0.1	4219	4255	4237	
50-350-04	0.1	4255	4348	4301	
75-350-01	0.1	4274	4311	4292	4265
75-350-03	0.1	4310	4219	4264	
75-350-04	0.1	4273	4201	4237	

**Tableau III.5 :** Calcul de la vitesse de son de dosage 400 Kg/m<sup>3</sup>

Dosage (Kg/m <sup>3</sup> )	Distance (m)	V <sub>1</sub> (m/s)	V <sub>2</sub> (m /s)	V <sub>Moy</sub> (m/s)	V <sub>Moy</sub> (m/s)
00-400-01	0.1	4444	4525	4484	4481
00-400-02	0.1	4505	4484	4494	
00-400-03	0.1	4425	4505	4465	
25-400-01	0.1	4255	4219	4237	4357
25-400-02	0.1	4348	4291	4319	
25-400-03	0.1	4484	4366	4425	
25-400-04	0.1	4329	4464	4396	
25-400-05	0.1	4329	4484	4406	
50-400-01	0.1	4255	4348	4301	4269
50-400-02	0.1	4237	4274	4255	
50-400-03	0.1	4219	4255	4237	
50-400-04	0.1	4329	4237	4283	
75-400-01	0.1	4310	4310	4310	4220
75-400-02	0.1	4201	4219	4210	
75-400-03	0.1	4149	4201	4175	
75-400-04	0.1	4291	4310	4300	
75-400-05	0.1	4132	4081	4106	

**Identification :**

V<sub>1</sub> Et V<sub>2</sub> : la vitesse de son

**00-350-01:** 00-pourcentage de béton recyclé – 350-dosage de ciment – 01-numéro d'éprouvette

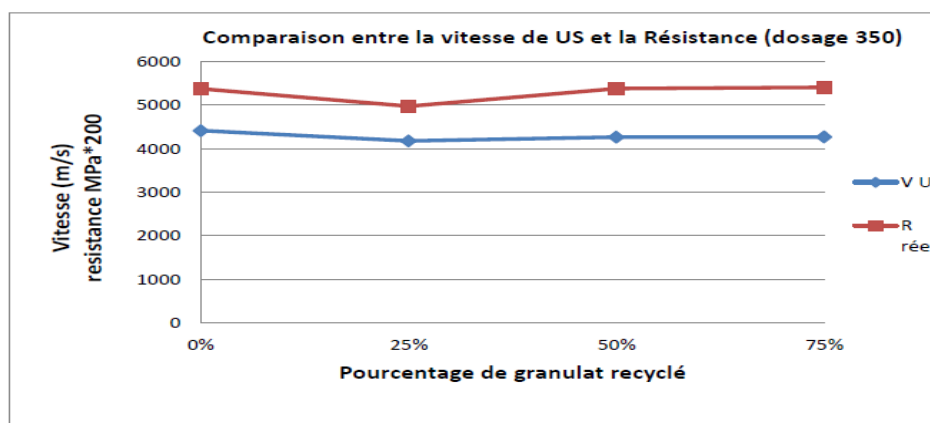
- **Les résultats d'essai de compression :**

L'essai de compression (essai destructif) a donné les résistances pour les éprouvettes (10\*10\*10) cm<sup>3</sup>, à partir de la charge appliquée en (KN), on a calculé la contrainte moyenne pour chaque éprouvette et les résultats présentés dans le Tableau suivant :

**Tableau III.6 :** La Résistance moyenne pour chaque mélange

Dosage (kg/m <sup>3</sup> )	Résistance (Mpa)
00-350	26.86
25-350	24.86
50-350	26.89
75-350	27.03
00-400	33.35
25-400	29.35
50-400	30.42
75-400	29.11

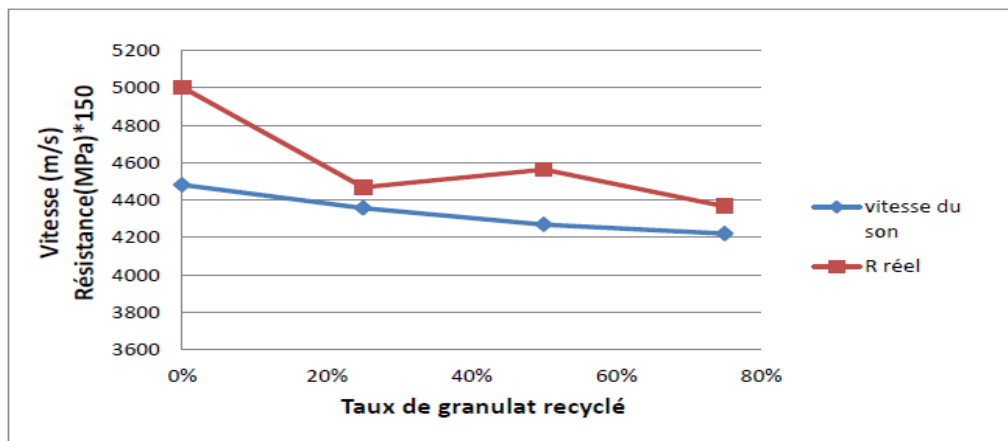
Les graphes de Figure (III.34 et III.35) ont été présentés suivant la relation entre la vitesse de son et le taux de granulat recyclé aussi la relation entre la résistance destructive et le taux de granulat recyclé.



**Figure III.34 :** Courbe de vitesse du son et de Résistance (dosage 350).

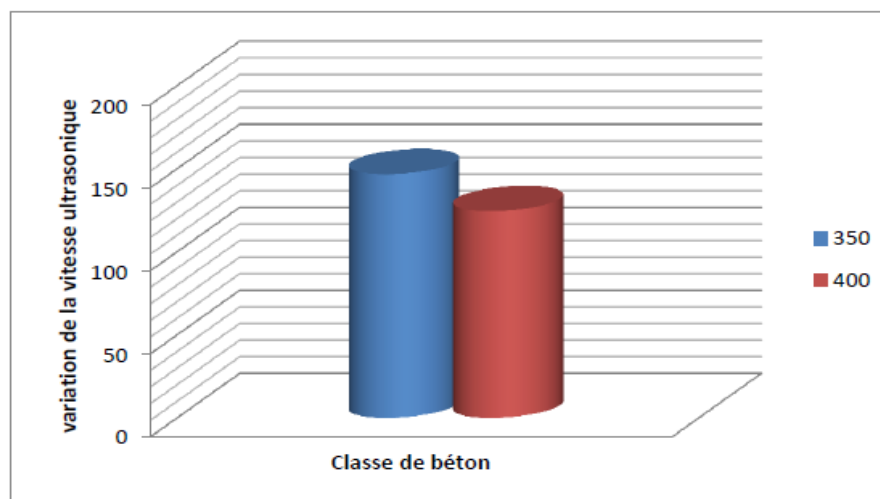
On remarque d'après la figure III.34, la même allure dans les deux graphes et la même tendance, ce qui nous permet de conclure que la vitesse du son dans le volume donne une bonne représentation de la résistance. Aussi d'après l'allure de cette courbe on peut constater

aussi que la différence résistance - vitesse ultrasonique est faiblement influencée par le taux de substitution lorsqu'une addition de ciment est incorporée afin de corriger la résistance du béton recyclé tel que proposé par Maizi et Aouti, (2014).



**Figure III.35:** Courbe de vitesse du son et de Résistance (dosage 400).

De même on remarque d'après la figure III.35, les mêmes constatations que précédemment. La variation de la vitesse ultrasonique étant faible voir figure III.36



**Figure III.36:** La variation de la vitesse ultrasonique.

Ceci nous permet de conclure que la méthode ultrasonique peut bien représenter la résistance des bétons y compris les bétons recyclés et ce quelques soit le taux de substitution, toutefois un léger ralentissement est observé pour le béton recyclé.

### III.6.2 Détection du degré d'endommagement du béton par ultrason [A.R]

➤ **ABDESSEMAD RIMA et all**

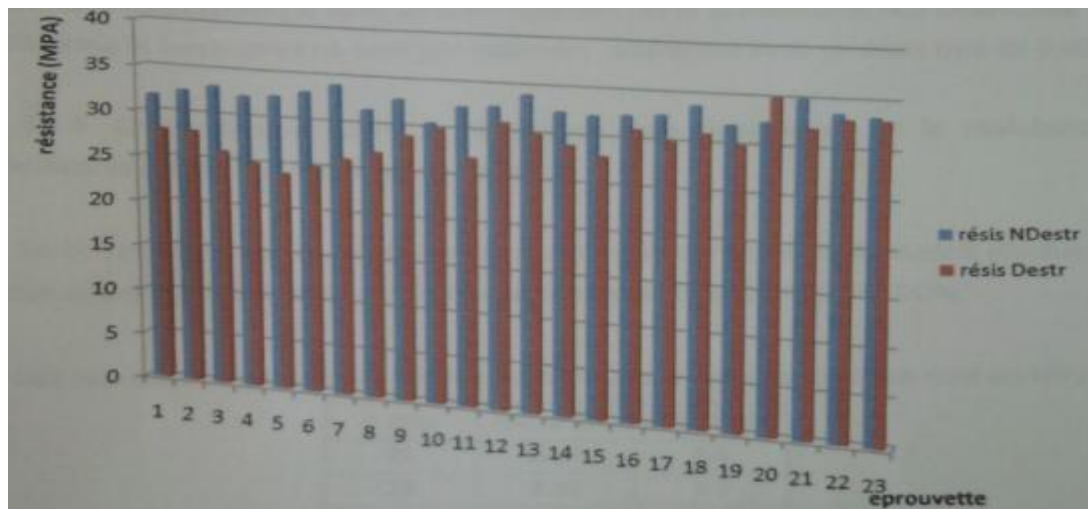
- **Comparaison entre la résistance non destructive et la résistance destructive :**

Le tableau suivant représente une comparaison entre la résistance non destructive indiquée par l'ultrason et la résistance réelle ou de rupture après écrasement des 23 éprouvettes.

**Tableau III.7 :** Comparaison entre la résistance non destructive et la résistance réelle par ultrason et destructive par essai de compression.

	Résistance non destructive (MPa)	Résistance destructive (MPa)
1	31.78	28
2	32.44	28
3	33.11	26
4	32.21	25
5	32.44	24
6	33.11	25
7	34.04	26
8	31.56	27
9	32.88	29
10	30.50	30
11	32.44	27
12	32.66	31
13	34.04	30
14	32.44	29
15	32.21	28
16	32.44	31
17	32.66	30
18	33.81	31
19	31.99	30
20	32.44	35
21	35.01	32
22	33.57	33
23	33.34	33

Les résultats sont indiqués sur la figure suivante :



**Figure III.37 :** Comparaison entre la résistance réelle et destructive

**Tableau III.8:** Résistance caractéristique du béton et écart type.

	Résistance non destructive (MPa)	Résistance destructive (MPa)
Résistance moyenne	32.75	29.04
Ecart type	0.95	2.85
Résistance caractéristique	31.18	24.37

La comparaison entre la résistance destructive et la résistance non destructive nous montre que la résistance mesurée à partir de la vitesse du son dans le béton ou non destructive et la résistance réelle ou destructive par compression est variable d'une éprouvette à l'autre.

Aussi on peut remarquer d'après une comparaison entre la résistance destructive et non destructive que la résistance moyenne destructive est un peu plus grande que celle caractéristique avec un écart type de 2.85 et la résistance non destructive moyenne et destructive ne sont pas tellement différentes avec un écart type de 0.95

### III.6.3 La mesure de la résistance du béton a la traction [B.R][A.K]

➤ **BENSALEM RAOUYA et ATAILIA KHADRA et all**

Cette partie de travail présente les résultats de mesure de la résistance en traction par les méthodes d'essais utilisées ainsi que la résistance à la compression mesurée par la méthode destructive et par la méthode non destructive effectuée sur les différents échantillons testés.

• **Résultats des essais de compression :**

Le tableau III.9 rassemble les résultats de mesure de la résistance à la compression à l'âge de 28 jours mesurés sur cube et cylindre par les deux méthodes.

**Tableau III.9 :** Résultats de mesure de la résistance à la compression mesurée par la méthode non destructive et par l'écrasement.

Eprouvettes (cm)	Résistance non destructive en (MPa)	Résistance destructive en (MPa)	Rapport
			$\frac{Rc\ destructive}{Rc\ nondestructive}$
Cubes (10*10*10)	31.5	33	1.04
	32.7	34	1.03
	34.2	35.5	1.03
	30.4	33.7	1.10
Cylindres (11*22)	25.14	27.5	1.09
	25.14	28	1.11
	25.65	29.2	1.13

• **Valeurs moyennes :**

Le tableau III.10 rassemble les valeurs moyennes des résistances mesurées par les 2 méthodes, ainsi que la mesure de la dispersion par l'écart type et par le coefficient de variation en pourcentage. Ce dernier est donné par la formule :

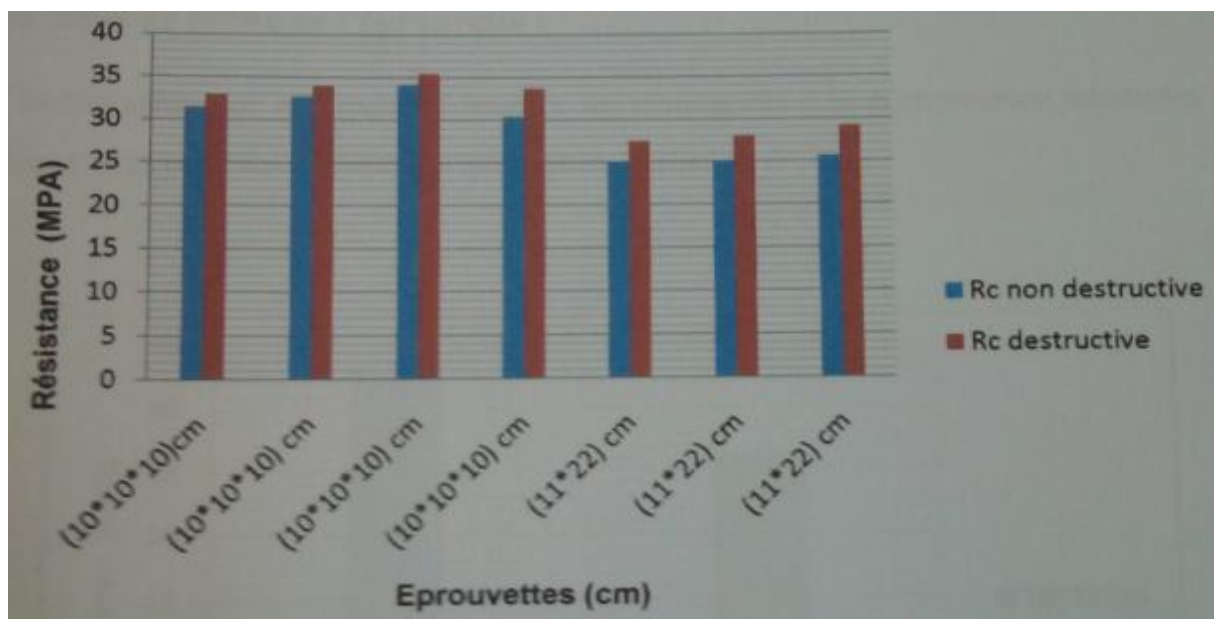
$$CV = \frac{\text{écart type}}{\text{moyenne}} \times 100 \%$$

Les chiffres entre parenthèses représentent les écart-types.

**Tableau III.10:** Moyenne mesurée par les 2 méthodes, Ecart-type et coefficient de variation :

Eprouvettes (cm)	Moyenne mesurée par la méthode non destructive (ultrason) et écart-type en (MPa)	Coefficient de variation	Moyenne mesurée par la méthode destructive (écrasement) et écart-type en (MPa)	Coefficient de variation
Cubes (10*10*10)	32.2 ± (1.63)	5.06 %	34.05 ± (1.05)	3.08 %
Cylindres (11*22)	25.31± (0.29)	1.14 %	28.23 ± (0.87)	3.08 %

Ces résultats sont indiqués sur l'histogramme de la figure III.38:



**Figure III.38:** Comparaison entre la résistance mesurée par la méthode non destructive et par la méthode destructive sur toutes les éprouvettes.

La comparaison entre la résistance à la compression du béton mesurée par la méthode non destructive et la résistance mesurée par la méthode destructive nous montre que la résistance mesurée à partir de la vitesse du son dans le béton ou non destructive et la résistance destructive par compression est variable d'une éprouvette à l'autre.

Cette dispersion est une caractéristique des bétons et des matériaux granulaires. L'ordre de grandeur des coefficients de variation pour les différents types d'éprouvettes ne dépasse pas

5.06 %. Cette ordre de grandeur est acceptable et rentre en général dans la plage toléré pour les bétons de chantier.

- **Comparaison entre les valeurs mesurée par les deux méthodes utilisée :**

Comme on peut le remarquer sur l'histogramme de la figure III.38 il n'y'a pas de différence significative entre les valeurs des résistances mesurées par la méthode destructive et celles mesurées par la méthode non destructive. Les rapports entre les résistances montrés dans le tableau III.10 ne sont pas importants et ne dépassent pas 1.13. Il apparait que la résistance mesurée par la méthode destructive est légèrement supérieure à celle mesurée par la méthode non destructive. Toutefois cette différence n'est pas significative.



## Conclusions

Dans cette partie de travail nous avons essayé de rassembler les conclusions des travaux effectués sur la comparaison des résultats obtenus par les méthodes destructives et les méthodes non destructives pour le contrôle de la qualité de béton

A partir des études antérieures réalisés on peut citer les conclusions suivantes

- Il apparaît que l'utilisation de plus d'une technique non destructive donne une meilleure corrélation et en ce sens contribue à rendre l'évaluation de la résistance du béton plus fiable.
- La méthode combinée (scléromètre + ultrasons) semble donc plus prometteuse pour l'évaluation de la résistance à la compression du béton en chantier. Il sera par ailleurs remarqué que les corrélations entre les essais destructifs et les techniques non destructives donnent des résultats plus probants pour les éprouvettes coulées et conservés dans les mêmes conditions que le béton de l'ouvrage.
- En général la méthode combinée apparaît plus adaptée aux conditions de mesures sur site ; très pratique, rapide et avec un coût raisonnable.
- Il est possible de développer des bonnes corrélations entre la résistance à la compression par écrasement et les mesures non destructives correspondantes (indice de rebondissement et vitesse ultrasonique) pour l'ensemble des bétons.
- Les essais d'arrachement (destructif) peuvent être remplacés par les essais non destructifs toute en s'intéressant à l'état de surface.
- Les résultats de scléromètre sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de la section, le degré d'humidité du béton, le type de ciment et de gros granulats, l'homogénéité du béton, La tête du marteau doit toujours être positionnée de façon perpendiculaire à la surface du béton, vibration, dureté de la surface sur la quelle frappe la masse, la rugosité de surface.
- Il ressort de l'ensemble des résultats que les essais sclérométriques conviennent mieux aux bétons relativement âgés plutôt qu'aux bétons jeunes. L'augmentation du rapport S/S+G contribuent à diminuer la différence entre les deux résistances pour l'ensemble des âges des bétons et au-delà d'une certaine valeur de ce rapport la granulométrie n'a que très peu d'influence sur le rapport des deux résistances. Quant à la variation du rapport E/C, elle n'a pas d'influence sur la relation entre les deux résistances. La dispersion reste inférieure à 10 % pour une variation du rapport E/C de 26 %.

- Il y a une différence entre les essais destructifs et les essais non destructifs (sclérométrique) de précision entre  $\pm 15$  et  $\pm 20\%$  selon plusieurs facteurs que influent les essais non destructifs :
- Les résultats des ultrasons sont influencés par des facteurs tels que, les conditions d'humidité, le rapport entre les granulats et le ciment, le type des granulats et la localisation des aciers et les fissures, la rugosité de surface, Les vides à l'intérieur du béton.
- La résistance à la compression réelle du béton pour des bâtiments peut être indirectement estimée par l'équation suivante :

$$R = -199 + 123 * V$$

- Des études réalisées ont montré que la corrélation avec la résistance à la compression a la forme suivante :

$$R_c = 0.8177 * e^{(0.00147 * V)}$$

- La résistance et le module d'élasticité dynamique sont liés par la relation suivante :

$$R_c = 1.67 * e^{(E_d / 122500)}$$

- Le rapport entre le module d'élasticité statique et le module dynamique qui est toujours inférieur à l'unité est d'autant plus élevé que la résistance du béton augmente. Ce rapport variable entre deux modules signifie qu'il n'y a pas de conversion simple du module élastique  $E_i$ , dont la connaissance est nécessaire pour la conception des structures en béton.

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

### Conclusion générale

A l'issu de cette étude on peut conclure que :

Les essais destructifs ne peuvent pas être entièrement remplacés par les essais non destructifs puisque cela dépend de plusieurs facteurs et chaque cas peut se traiter différemment :

- Lorsque la réalisation des prélèvements est impossible soit pour des raisons d'accessibilité ou de sensibilité de l'ouvrage nous somme obligé de procéder à des méthodes non destructives mais l'interprétation des résultats doit prendre en compte les corrélations entre les deux méthodes.
- Les méthodes non destructives peuvent être utilisées comme des techniques additionnelles lorsqu'elles seront exécutées avec des méthodes destructives.
- Les essais d'arrachement peuvent être remplacés par les essais non destructifs toute en s'intéressant à l'état de surface.
- Pour le béton âgé les essais sclérométriques conviennent mieux pour l'évaluation de la qualité du béton.
- L'utilisation de la méthode combinée permet de mieux estimer la résistance ponctuelle du béton in situ.
- La méthode ultrasonique ne peut permettre d'évaluer la résistance en compression mais elle permet une appréciation qualitative des bétons comme préconisé par les différentes études.
- Il y a plusieurs relations de corrélations entre les valeurs de résistances mesurées par les deux méthodes.

A travers cette étude nous avons amélioré nos connaissances sur les domaines d'utilisation des essais non destructifs surtout lorsqu'il s'agit de l'évaluation de la qualité du béton.

---

## Références bibliographiques

[A.R] **Abdessemad Rima** ; «Détection du degré d'endommagement du béton par ultrason »  
Mémoire de Master en Génie Civil.

[A.S] **Ayoub Souad**, «L'utilisation de la Technique Ultrasonique dans le cas de Béton Recyclé». Mémoire de Master en Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, 2015.

[B.A] **Benouis Abdelhalim \***, **Khaldi Nacera**, et **Cherait Yacine**, «Comparaison des résistances des bétons déterminées par écrasement et par scléromètre : influence de la composition ». Université de Guelma ; 2007.

[B.R][A.K] **Bensalem Raouya** et **Atailia Khadra** ;«La mesure de la résistance du béton a la traction », Mémoire de Master en Génie Civil, 2012

[B.KH][G.M][K.S] **Benyahia khodja Ali**, **Ghrici Mohamed**, **Kenai Said**, «Corrélations entre essais non destructifs et essais destructifs du béton à faible résistance mécanique». Université de Chlef.

[B.M/A] **Bouakkaz Mohammed El Amin**, «Caractérisation du béton par les méthodes non destructives-Application de la méthode de fréquence de résonance». Mémoire de Magister en Génie Civil, université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, juin 2012.

[B.B] **Boufedah Badissi**, « Influence de la granularité (classe granulaire 4/22.4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des béton ordinaires » Mémoire de Magister en Génie Civil. Université MENTOURI Constantine, Janvier 2011.

[B.DJ] **Boukhelkhal Djamila**, **Kenai Said**, «Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre & Ultrason) ». Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France.

[Carino 03] **Carino. N**, «Nondestructive test methods to evaluate concrete structures», 6ème conférence Internationale sur la durabilité du béton (CANMET/ACI), Thessalonique (Grèce), 75 p., Juin, 2003.

[CH.Y][N.Z] **Dr. Cherait Yacine Mr.Nafa .Z** «éléments de matériaux de construction et essais ».

---

**[F.Y][H.O] Fenineche Yaakoub, Hemmouda Oussama**, «Bases expérimentales pour l'établissement d'une corrélation entre les essais destructifs et non destructifs : cas d'un béton ordinaire». Mémoire de Master en Génie Civil, Université MENTOURI Constantine ; 2013.

**[Greaves 96] Greaves, R.J, Lesmes, D.P, Lee, J.M, Toksöz. N.** (1996). «Velocity variations and water content estimated from multi-offset, ground-penetrating radar, Geophysics, 61 (3), pp .683-695.

**[H.S][G.M/N] S. Hannachi, M.N. Guettache**, « le contrôle non destructif des ouvrages en béton évaluation de la résistance du béton a la compression sur site : application de la méthode combinée » Université Mentouri Constantine, 2011.

**[Hassani 97] Hassani, F.P., Sadri, A., Momayez, A.** (1997b). «A miniature seismic reflection system for evaluation of concrete linings”. Pure and Applied Geophysics,vol. 150, 1997, pp. 677-691.

**[Hassani 04]**. « Conception d'un nouvel appareil d'auscultation des couches de béton projeté sur les parois des galeries de mines souterraines » publication de L'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), Québec, pp. 10- 13, 2004

**[HOB 07] Hobbs B., Tchoketch kebir M.**, « Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings», Forensic Science International vol. 167, 2007, p. 167–172

**[IAEA 02] International Atomic Energy Agency** ”Guidebook on non-destructive testing of concrete structures” Vienna, Austria, September, 2002, pp. 82-98.

**[IDR 06] Idrissou M.M.**, Reliability in interpreting non-destructive testing (NDT) results of concrete structures, Master Thesis, University of Malaysia, 2006.

**[K.N] Kedjor Nasr-eddine**, «Le laboratoire du béton». Office des publications universitaire.

**[K.F][B.H] Kerrouchi Faycel, Boukous Houssef Eddin**, «Bases expérimentales pour l'établissement d'une corrélation entre les essais destructifs et non destructifs : cas du béton autoplacant ». ». Mémoire de Master en Génie Civil, Université MENTOURI Constantine 2013.

---

**[KLYSZ 04] G. Klysz ; « Caractérisation du béton d'enrobage par technique radar exploitation de l'onde directe émetteur- récepteur » Thèse de doctorat de l'univ. De Toulouse III - Paul Sabatier, 2004.**

**[KLYSZ 05] Klysz, G, Balayssac, J.-P, Laurens, S. (2005). « Spectral analysis of radar surface waves for non-destructive evaluation of cover concrete » NDT&E International, article sous presse.**

**[Kodjo 08] Kodjo, S. (2008). «Contribution à la caractérisation des bétons endommagés par des méthodes de l'acoustique non linéaire. Application à la réaction alcalis-silice » Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke.**

**[Laurens 02] Laurens, S., Balayssac. J.-P., Rhazi, J., Arliguie, G. (2002). « Influence of concrete moisture upon radar waveform, RILEM Mater Struct, 35, (248), p. 198-203.**

**[M.A][K.N] Mehamdia Ali et Khaldi Nacera, «Contrôle du béton par des essais non destructifs». Mémoire de Master en Génie Civil, Université du 8 Mai 1945 Guelma, juin 2012.**

**[Naar 06] S. Naar « Evolution Non Destructive Du Béton Par Mesure De Résistivité Electrique Et Thermographie Infrarouge Passive » thèse de doctorat en cotutelle de l'université De Bordeaux 1 et l'université De Sherbrooke, pp. 153-196, Mai, 2006**

**[R.D][J.S] R.Dupain, J-C Saint.Arroman. «Granulats, Sols, ciments, et bétons » Editions Casteilla.**

**[S.K][H.K][K.N] Sakloul Kamel et Hannachi Kheirredine et Khaldi Nacera, «Caractérisation de l'adhérence des mortiers avec différents supports » Mémoire de Master en Génie Civil, Université du 8 Mai 1945 Guelma, juin 2015.**

**[Sbartai 04] Sbartai, Z.M., Klysz, G., Laurens, S., Balayssac, J.-P., Ballivy, G.,**

**Arliguie, G. (2004). «Aptitude de l'onde directe radar à la détection des gradients d'humidité dans le béton: Essais en laboratoire et étude de cas », INFRA 2004, 15-17 Nov. 2004, Montréal.**

**[Sbartai 05] Sbartai, Z.M. « Caractérisation physique des bétons par radar –Approche neuromimétique de l'inversion » Thèse de doctorat de l'université de Toulouse III - Paul Sabatier, 2005.**

---

[SOS 06] Soshiroda T., Voraputhaporn K., Nozaki Y., « Early-stage inspection of concrete quality in structures by combined nondestructive method », Materials and Structures, vol. 39, 2006, p. 149–160

[Weil 88] G.J. Weil « Infrared Thermal Sensing of Sewer Voids » 4 Year Update, Proc. Thermosense X, 934 155, 1988.

[Weil 89] G.J. Weil « Non-destructive remote sensing of subsurface utility distribution pipe problems using infrared thermography » Proc. 2nd Int. Conf. on Pipeline Constr. Cong. Centrun. 1, Hamburg, 1989.

## NETGRAPHIE

[NET 1] [http://www.gramme.be/unite9/beton/Documents/1\\_Composition\\_du\\_beton.pdf](http://www.gramme.be/unite9/beton/Documents/1_Composition_du_beton.pdf)

[NET 2] <http://ft.univ-setif.dz/externe/departements/gc/Chapitre-I-les-Betons-MDC-II.pdf>

[NET3] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Control\\_non\\_destructif](https://fr.wikipedia.org/wiki/Control_non_destructif)

[NET4] <http://thesis.univ-biskra.dz/1328/5/partieI%20chapitre%2003.pdf>

[NET 5] <http://doc.lerm.fr/lauscultation-du-beton-precontraint-par-gammagraphie-entretien-avec-pierre-roennelle-chef-dunite-au-cerema-unite-pathologie-des-structures-et-diagnostic-a-bron-69/>