

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKID - TLEMCEM



Faculté de Technologie  
Département de Génie Civil

## Mémoire

De fin d'études pour l'obtention de diplôme de Master en Génie civil  
Option : Structures

Intitulé

# Contrôle de la qualité de béton par des essais destructifs et non destructifs

Présenté par

M. Guemmoun Ismail

Devant le jury composé de :

Dr. TALEB Omar

PCA

Encadrant

Dr. HOUTI Farid

MAA

Président

Pr. SAIL Latéfa

Pr

Examinatrice

Année Universitaire 2020 - 2021

## REMERCIEMENTS

A la mémoire de M. Boukli Hacène Mohammed Amine

Ce mémoire a été réalisé au laboratoire EOLE de Tlemcen et celui des études CTTTP de Bachjarah (wilaya d'Alger), sous la direction et la bienveillante supervision du Pr. Mohamed amine BOUKLI HACENE, du Dr. Omar TALEB et de madame S. ATTIQUE ingénieure en CTTTP.

Je tiens à remercier monsieur Mohamed Amine BOUKLI HACENE, qui m'a accordé l'honneur de travailler sur un sujet sur le matériau le plus utilisé au monde. Je tiens à remercier M. Taleb Omar qui m'a aidé à finaliser ce modeste travail.

Mes remerciements vont aussi à madame S. ATTIQUE dont l'aide a été plus que précieuse.

Je finis par remercier toutes les personnes qui m'ont aidé et soutenu, de près ou de loin, lors de la réalisation de ce travail et pendant mon parcours universitaire.

Je remercie aussi madame Fatima Zohra Belhadj qui m'a aidé pour faire le power point

## RESUME

La durabilité des structures est conditionnée par la qualité du béton utilisée. Le béton doit non seulement avoir les caractéristiques rhéologiques nécessaires pour une bonne mise en place, mais en plus sa formulation doit être correctement optimisée pour atteindre les caractéristiques mécaniques de durabilité adéquates.

La caractérisation du béton est donc primordiale avant la phase de construction pour avoir les données de pré-dimensionnement ; pendant la réalisation pour le suivi et après la phase de la construction pour l'entretien de l'ouvrage.

Pour la détermination de la résistance du béton, des contrôles directs peuvent être réalisés sur des éprouvettes normalisés ou sur des carottes issues de l'ouvrage. Des méthodes non destructives permettent aussi de déterminer des paramètres qui sont utilisés pour l'estimation de la résistance.

Ce travail à caractère bibliographique regroupe les principaux essais destructifs et non destructifs qui sont utilisés au niveau des laboratoires et des chantiers. Des relations corrélatives entre ces différents essais sont aussi énumérées et interprétées.

### Mots-clés :

Essais non destructifs, essais destructifs, béton, résistance, corrélation.

## **ABSTRACT**

The durability of structures is conditioned by the quality of the concrete used. The concrete must not only have the rheological characteristics necessary for a good placement, but in addition its formulation must be correctly optimized to achieve the adequate mechanical characteristics of durability.

The characterization of the concrete is therefore essential before the construction phase to have the pre-dimensioning data; during construction for monitoring and after the construction phase for maintenance of the structure.

To determine the strength of the concrete, direct checks can be carried out on standard specimens or on cores from the structure. Non-destructive methods can also determine parameters that are used for resistance estimation.

This bibliographical work brings together the main destructive and non-destructive tests which are used at the level of laboratories and construction sites. Correlative relationships between these different tests are also listed and interpreted.

### **Key words :**

Non-destructive testing, destructive testing, concrete, strength, correlation

## ملخص

تتأثر متانة الهياكل بجودة الخرسانة المستخدمة. لهذا يجب أن تكون للخرسانة الخصائص الريولوجية اللازمة للوضع جيد كما يجب أيضًا تحسين صياغتها بشكل صحيح لتحقيق الخصائص الميكانيكية المناسبة للمتانة.

لهذا يعد توصيف الخرسانة أمرًا ضروريًا قبل الشروع في البناء من أجل الاطلاع على بيانات الدراسة، وأثناء الإنشاء للمتابعة و المراقبة و بعد مرحلة البناء لصيانة البناية.

و يمكن إجراء فحوصات مباشرة لتحديد قوة الخرسانة على عينات قياسية أو على قلب من الهيكل. كما يمكن استعمال الطرق غير الاتلافية لتحديد المعلمات المستخدمة لتقدير المقاومة.

يجمع هذا العمل الببليوغرافي على طرق المستعملة لتوصيف الخرسانة أكانت الاختبارات الاتلافية و غير الاتلافية المستخدمة على مستوى المختبرات ومواقع البناء. يتم أيضًا سرد العلاقات الترابطية بين هذه الاختبارات المختلفة وتفسيرها.

الكلمات المفتاحية :

الاختبارات غير الإتلافية - الاختبارات الإتلافية - الخرسانة - المقاومة - علاقة ارتباط

# Sommaire

Remerciement  
Résumé  
ABSTRACT  
ملخص  
Liste des figures  
Liste des tableaux  
Introduction générale

## TITRE

### CHAPITRE 1 : LE MATEREAU BETON

	page
<b>1.1. Introduction</b>	12
<b>1.2. Les composantes de béton</b>	12
1.2.1. Le ciment	12
1.2.2. L'eau de gâchage	13
1.2.3. Les granulats	13
1.2.4. Les adjuvants	13
1.2.5. Les addition	14
1.2.6. Le malaxage des constituants	14
<b>1.3. Propriété essentielle d'un béton ordinaire</b>	15
1.3.1. À l'état frai	15
1.3.2 À l'état durci	17
<b>1.4. Paramètre qui influe sur la résistance à la compression du béton</b>	18
Influence du dosage en ciment	18
Influence du rapport eau/ciment	19
Influence d'air d'occlus	21
Influence de la taille maximale du granulat Dmax	22
Influence des additions	22
Influence des adjuvants	25
<b>1.5. La conclusion</b>	26

## TITRE

### CHAPITRE 2 : LES ESSAI MECANIQUE

<b>2.1. Introduction</b>	27
<b>2.2. Evaluation De La Résistance sur Site</b>	27
<b>2.3. Contrôle par les méthodes non destructifs</b>	27
2.3.1. Les ultrasons	27
2.3.1.1. La définition	27
2.3.1.2. L'objectif de la méthode	28
2.3.1.3. Domaine d'application	28
2.3.1.4. Avantage et inconvénient d'ultrason	29
2.3.1.5. Principe d'essai	29

2.3.1.6. Paramètres qui influent sur la vitesse d'onde ultrason	34
2.3.2. Le scléromètre ou rebond HAMMER	34
2.3.2.1. La méthode d'indentation	34
2.3.2.2. Fonctionnement de scléromètre	36
2.3.2.3. Objectif essai de scléromètre	36
2.3.2.4. Avantage et inconvénient d'essai de scléromètre	36
2.3.2.5. Les paramètres qui influent sur essai au scléromètre	37
2.3.2.6. Principe d'essai au scléromètre	37
2.4. Contrôle par les méthodes destructives	39
2.4.1. Essai de compression traditionnel	39
2.4.1.1. Introduction	39
2.4.1.2. Les domaines d'utilisation de l'essai	40
2.4.1.3. Principe de l'essai de compression	40
2.4.1.4. Dimension de l'éprouvette utilisée	41
2.4.1.5. Inconvénients de l'essai	42
2.4.2. Essai de traction par fendage	42
2.4.2.1. Introduction	42
2.4.2.2. Principe de l'essai de traction par fendage	42
2.4.2.3. Description de l'essai	43
2.4.3. Essai de traction directe	46
2.4.3.1. Conduit d'essai	46
2.4.4. Essai de traction par flexion	46
2.4.4.1. Principe d'essai	47
2.4.4.2. Le déroulement d'essai	47
2.5. La conclusion	48

## TITRE

### CHAPITRE 3 : RESULTAT ET INTERPRETATION

3.1. Introduction	49
3.2. Corrélation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité Dynamique	49
3.3. La relation entre la vitesse de propagation d'une onde ultrasonore et La résistance à la compression	50
3.4. La corrélation entre l'essai de scléromètre et essai de compression	52
3.5. Application de la méthode combinée pour l'estimation de la résistance A la compression	54
3.6. la conclusion	59
Conclusion générale	60
Référence bibliographique	62

## Liste de figure

### Le chapitre 1 :

La Figure 1.1. Essai d'affaissement	16
La Figure 1.2. : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton (Baron et al., 1996 cité par Boukli., 2010).	18
La Figure 1.3. : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme (Baron et al ., 1996).	19
La Figure 1.4. : L'influence du rapport E/C sur la maniabilité (Meftah et al ., 2012)	19
La Figure 1.5. : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours Et le rapport eau/ciment (Boukli, 2010).	20
La Figure 1.6. : Valeurs des résistances en fonction du rapport C/E (Neville, 2000)	20
La Figure 1.7. : Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons Conservés À l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus (Boukli., 2010)	21
La Figure 1.8. : Variation du besoin en eau des mortiers C1 (CPJ CEM II/A 42.5) en fonction de la finesse des additions (Boudchiha ., 2007).	22
Figure 1.9. : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 (CPJ CEM II/A 42.5) en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition (Boudchicha ., 2007)	23
La Figure 1.10. : Comparaison des évolutions des résistances en compression B.T, béton témoin ; B.Z., 20, 25, 30, béton à base de ciment pouzzolanique à un dosage de 20, 25, ou 30 % de pouzzolane (Belas et col ., 2003)	24
La Figure 1.11. : Effet de la pouzzolane sur la résistance à la compression (Mouli et al ., 2008)	24
La Figure 1.12. : Variation de la résistance à la compression d'un béton adjudante (Adjoudj et col., 2009)	25

### le chapitre 2 :

figure 2.1. : Les différentes ondes acoustiques et leur fréquence (bouakkeze, 2011)	28
Figure 2.2. : Le principe de méthode de propagation (bouakkeze, 2011)	30
Figure 2.3. : les points des mesures (magramons, sans date)	31
Figure 2.4. : Mesure transparence (Harride., 2016)	32
Figure 2.5. : Mesure en surface (Harride., 2016)	32
Figure 2.6. : Vitesse en fonction du parcours	33
Figure 2.7. : Méthode semi transparence (Harride., 2016)	33
Figure 2.8. : les constituants de scléromètre (hannachi, 2015)	35
Figure 2.9. : éléments a testé par scléromètre	38
Figure 2.10. : Grille de mesure sur l'ouvrage (magramons, sans date)	39
Figure 2.11. : La machine de compression traditionnelle	39
Figure 2.12. : Rupture de l'éprouvette au cours de l'essai de compression	40

<b>Figure 2.13. : les méthodes de carottage (Hannachi., 2015)</b>	<b>41</b>
<b>Figure 2.14. : Essai de traction par fendage</b>	<b>42</b>
<b>Figure 2.15. : Développement des contraintes de traction suivant (redjal, sans date)</b>	<b>43</b>
<b>Un plan médian</b>	
<b>Figure 2.16. : Répartition des contraintes de traction suivant le plan diamétrale Verticale lors d'essai de traction par fendage (redjal, sans date)</b>	<b>44</b>
<b>Figure 2.17. : Répartition des contraintes de traction suivant Les plans diamétraux (Verticale et horizontale) (redjal, sans date)</b>	<b>44</b>
<b>Figure 2.18. : La presse brésilienne</b>	<b>45</b>
<b>Figure 2.19. : Dispositifs de mise en charge de l'éprouvette cylindrique Pour essai de traction par fendage (redjal, sans date)</b>	<b>45</b>
<b>Figure 2.20. : Essai de traction directe</b>	<b>46</b>
<b>Figure 2.21. : Essai de flexion</b>	<b>47</b>
<b>Figure 2.22. : Dispositif de flexion de 4 points (Harride., 2016)</b>	<b>47</b>
<b><u>Le chapitre 3 :</u></b>	
<b>Figure 3.1. : Evolution du module d'élasticité dynamique en fonction de la vitesse des ondes acoustique (Benmammar, 2019)</b>	<b>49</b>
<b>Figure 3.2. : Relation entre la résistance à la compression et la vitesse des ondes ultrasonores (Benmammar, 2019)</b>	<b>50</b>
<b>Figure 3.3. : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique (Harride., 2016)</b>	<b>51</b>
<b>Figure 3.4. : Corrélation entre la résistance à la compression et l'UPV développée par divers chercheurs (Harride., 2016)</b>	<b>51</b>
<b>Figure 3.5. : Comparaison entre les modèles et les résultats expérimentaux (Harride., 2016)</b>	<b>52</b>
<b>Figure 3.6. : Relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement au scléromètre (Harride., 2016)</b>	<b>53</b>
<b>Figure 3.7 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissements (Harride., 2016)</b>	<b>53</b>
<b>Figure 3.8 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement établies par divers chercheurs (Harride., 2016)</b>	<b>54</b>
<b>Figure 3.9. : Corrélation entre la résistance, l'UPV et l'indice sclérométrique (Hannachi., 2015)</b>	<b>56</b>
<b>Figure 3.10 : Corrélation entre la résistance, l'UPV et l'indice sclérométrique (Hannachi., 2015)</b>	<b>56</b>
<b>Figure 3.11 : Courbe iso-réponse Résistance - indice de rebondissement – UPV</b>	<b>57</b>
<b>Figure 3.12 : résistance du béton a 7 jours</b>	<b>58</b>
<b>Figure 3.13 : résistance du béton à 14 jours</b>	<b>58</b>
<b>Figure 3.14 : résistance du béton à 28 jours</b>	<b>59</b>

## La liste des tableaux

### Le chapitre 1 :

<b>Le Tableau 1.1 : classe de consistance</b>	<b>16</b>
---	-----------

### Le chapitre 2 :

<b>Tableau 2.1 : La qualité du béton en fonction de la vitesse (Harride., 2016)</b>	<b>29</b>
<b>Tableau 2.2. : Énergie de l'impact en fonction de type de recul (magramons, sans date)</b>	<b>35</b>
<b>Tableau 2.3. : Les moyennes des mesure en fonction de type de recule</b> (magramons, sans date)	<b>36</b>
<b>Tableau 2.4. : Correction de la valeur de l'indice de rebondissements</b> <b>En fonction d'angle de l'inclinaison</b> (magramons, sans date)	<b>38</b>
<b>Tableau 2.5. : Les dimensions des éprouvettes</b>	<b>41</b>
<b>Tableau 2.6. : Les éprouvettes cylindriques utilisées dans l'essai</b> <b>De traction fendage</b> (redjal, sans date)	<b>42</b>

### Le chapitre 3 :

<b>Tableau 3.1. : Corrélation entre la résistance ,UPV et indice sclérométrique</b>	<b>55</b>
<b>Tableau 3.2 : les résultats de la résistance obtenue par des essais mécaniques</b> <b>Pour les différents âges pour une éprouvette cylindrique</b>	<b>57</b>
<b>Tableau 3.3 : les résultats de la résistance obtenue par des essais mécaniques</b> <b>Pour les différents âges pour une éprouvette cubique</b>	<b>57</b>

## INTRODUCTION GENERALE

Le béton est le matériau le plus utilisé dans le domaine de la construction grâce à ces avantages techniques et économiques (Harride., 2016). Ce matériau a de bonnes caractéristiques rhéologiques et mécaniques ainsi que sur le plan de la durabilité.

La présence des problèmes liés à la qualité du matériau peut causer des dégradations préjudiciables au sein de la construction (Hannachi., 2015).

Dans le but de contrôler la qualité du béton directement sur site, il existe certaines méthodes qui sont appliquées directement sur l'ouvrage et d'autres sur des éprouvettes normalisées préparées au moment du coulage du béton, ou encore sur des échantillons prélevés de la construction. Ces méthodes sont généralement normalisées et indiquées dans les différentes normes Algériennes (IANOR) ou européennes (AFNOR, BSI, ...). Parmi les méthodes utilisées, on peut distinguer des méthodes directes ou indirectes (attique, 2021)

Les méthodes directes se basent sur la destruction des éprouvettes testées (cylindrique ou cubique) d'où l'appellation d'essai destructif. Ils sont destinés soit à l'évaluation de la résistance à la compression (essais d'écrasements) (Hannachi., 2015), soit à la détermination de la résistance à la traction par fendage (Harride., 2016).

Pour les méthodes indirectes, elles peuvent être utilisables sans procéder à la destruction du matériau ou de l'éprouvette testée d'où l'appellation d'essai non destructif. Ces essais sont destinés à la détermination de certaines propriétés physiques du béton (la vitesse de propagation de l'onde, indice sclérométrique, ...) qui peuvent être converties en résistance à la compression par l'utilisation des abaques ou des relations de corrélation qui relient la résistance à la compression aux propriétés physiques du béton.

L'objectif de cette étude consiste à établir un état de l'art sur les protocoles de ces essais destructifs et non destructifs sur le béton et de faire une synthèse sur les travaux de recherches réalisés dans ce domaine.

Le mémoire va s'articuler autour des chapitres suivants :

- ✚ Le premier chapitre sera réservé à une introduction qui présente le matériau béton avec ses constituants.
- ✚ Le deuxième chapitre sera réservé à une étude bibliographique sur les différents essais utilisés pour caractériser le matériau béton.
- ✚ Le troisième chapitre sera consacré aux différentes relations corrélatives entre les résultats obtenus des différents essais destructifs et non destructifs.

Une conclusion clôturera ce mémoire.

## CHAPITRE I :

### LE MATERIAU BETON

#### 1.1. Introduction :

Le béton est un matériau composite, formé de ciment, d'eau, de granulats (sable et gravillons) et éventuellement d'ajouts (additions ou adjuvants) destinés à améliorer certaines de ses propriétés.

La qualité d'un béton dépend de ses constituants qui ont une influence sur son comportement à l'état frais (ouvrabilité) et ses performances à l'état durci (résistances).

#### 1.2. Les composants d'un béton

Le béton est un mélange de plusieurs composants : liants, eau, sable, graviers et le plus souvent, adjuvants. Chaque constituant joue un très grand rôle dans la fabrication du béton et leurs caractéristiques influent sur les propriétés à l'état frais et durci du matériau.

##### 1.2.1. Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière minérale finement moulue souvent d'une couleur grise qui mélangée avec l'eau forme une pâte qui fait prise et durcit à la suite du processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. La norme de référence des ciments courants est la norme européenne EN 197-1 publiée par AFNOR sous la référence NF EN 197-1

Les ciments composés sont fabriqués à partir :

- ✓ Du clinker qui est obtenu par cuisson, jusqu'à fusion partielle, d'un mélange dosé et homogénéisé comprenant essentiellement de la chaux, de la silice, de l'alumine et l'oxyde de fer ;
- ✓ Du laitier qui est obtenu par refroidissement brusque de la scorie en fusion provenant des hauts fourneaux ;
- ✓ De la pouzzolane ou des cendres volantes en provenance des centrales thermiques ;
- ✓ Des fillers qui sont obtenus par broyage de roches de qualités convenables et qui, par leur granularité, agissent sur certaines qualités des ciments (maniabilité etc.).

Le durcissement de la pâte de ciment est principalement dû à l'hydratation des silicates de calcium. Dans les ciments, les aluminates peuvent également intervenir dans le processus de durcissement. La somme des proportions de l'oxyde de calcium (CaO) et du dioxyde de silicium (SiO<sub>2</sub>) réactifs doit être d'au moins 50 % en masse.

##### • *Classification des ciments en fonction de leur composition:*

Dans la norme NF EN 197-1, les ciments courants sont subdivisés en cinq types selon la nature et la proportion des constituants.

Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse) :

- CEM I: Ciment portland (CPA);
- CEM II : Ciment portland composé (CPJ);
- CEM III : Ciment de haut fourneau (CHF);
- CEM IV : Ciment pouzzolanique (CPZ);
- CEM V : Ciment au laitier et aux cendres (CLC).

### **1.2.2. L'eau de gâchage :**

L'eau est essentiel pour la fabrication du béton. Elle joue trois fonctions principales ; elle participe au mouillage des granulats, confère au béton sa maniabilité à l'état frais et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement. La quantité d'eau employée pour le gâchage du béton est toujours supérieure à celle nécessaire pour l'hydratation du ciment.

La quantité d'eau introduite dans la composition du béton ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence d'une part sur la qualité du béton, et d'autre part sur la facilité de mise en œuvre. L'eau entrant dans la composition du béton doit être pure. Ce rapport oscille aux alentours de 0.5.

### **1.2.3. Les granulats :**

Les granulats sont des débris rocheux de diamètre compris entre 0 et 125mm. Ils peuvent être d'origine naturelle (sables et graviers de mer et de rivières) ou artificiels (argile expansée). Ils peuvent provenir de la carrière ou extraits du lit de rivières. Ils constituent le squelette du béton et améliorent sa résistance.

#### **• *Classification des granulats***

Les granulats sont classés en fonction de leurs grosseurs déterminées par criblage sur des tamis à mailles dont la dimension intérieure est exprimée en millimètres.

La norme française XP P 18-540 donne une définition des principales divisions granulométriques des granulats :

- sables 0/D ou  $1 < D \leq 6,3$  mm.
- graves 0/D ou  $D > 6,3$  mm.
- gravillons d/D ou  $d \geq 1$  et  $D \leq 125$  mm.

### **1.2.4. Les adjuvants :**

Les adjuvants sont des produits solubles dans l'eau, qui une fois incorporés aux bétons lors du malaxage ou lors de la mise en œuvre à de petites doses, permettent d'améliorer certaines de ses propriétés. Ils permettent de réduire les coûts de mise en œuvre grâce à l'amélioration de la plasticité du béton ou encore améliorer les propriétés des bétons durcis. Leur efficacité est liée à l'homogénéité de leur répartition dans la masse du béton ainsi qu'à la combinaison du ciment/adjuvant utilisée.

Il existe plusieurs types d'adjuvants qui sont régis par la norme NF EN 934-2, mais ceux qui conditionnent l'ouvrabilité du béton sont les super plastifiants et les plastifiants.

L'efficacité et les effets secondaires de chaque adjuvant peuvent varier en fonction de son dosage dans le béton et les divers composants de celui-ci, en particulier du ciment.

### **1.2.5. Les additions minérales :**

Il existe deux catégories de fines minérales :

- ❖ **Les fines actives** à caractère pouzzolanique, ce sont des particules de faibles diamètres qui ajoutées en petites quantités (10% à 30%) du poids de ciment, améliorent notablement les performances de résistances et de durabilité du béton grâce à leurs propriétés pouzzolaniques et à la formation de CSH supplémentaires.
- ❖ **Les fines inertes** comme les fillers calcaires qui servent à améliorer la compacité du béton et donc sa résistance. Elles sont parfois utilisées pour améliorer la consistance des bétons.

L'activité d'une addition minérale peut avoir deux effets différents :

#### ➤ **Effet chimique ou pouzzolanique**

La réaction pouzzolanique est une réaction chimique entre la silice et la portlandite. La silice est généralement apportée par une addition minérale telle que la cendre volante, la fumé de silice ou laitier de haut fourneau, la portlandite est produite par l'hydratation du ciment. La réaction pouzzolanique est une réaction qui ne peut avoir lieu qu'en présence d'eau. L'accroissement de résistance qu'elle provoque prend toute son ampleur pour les longues échéances, dans la mesure où elle a aussi besoin d'hydroxyde de calcium, hydrate sous-produit de la formation du CSH du clinker.

#### ➤ **Effet filler ou effet de remplissage**

Une addition minérale incorporée dans un mortier ou un béton modifie le squelette granulaire du mélange, qui peut compenser un déficit en particules fines. Le squelette se trouve alors optimisé par remplissage d'une partie du volume des vides, la maniabilité du mélange s'améliorant. Si la quantité d'eau est réduite pour conserver la même maniabilité, alors la résistance augmente, cet accroissement de la résistance est appelé effet filler.

### **1.2.6. Malaxage des constituants :**

Le malaxage est une phase importante dans la fabrication du béton, car les divers constituants d'un béton sont malaxés de façon à avoir un matériau de composition homogène, ayant par la suite des propriétés uniformes. Cette opération peut se faire soit avec un malaxeur à axe vertical, soit avec une bétonnière qui homogénéise le mélange par gravité en soulevant un volume de matériau et en le laissant par la suite tomber dans la masse. Le choix d'un appareil (bétonnière ou malaxeur) dépend de sa capacité de production, de son aptitude à malaxer différents types de mélanges (secs, pleins, plastiques) pour donner des bétons réguliers.

L'homogénéité du béton est un objectif primordial du malaxage. Les granulats sont d'abord introduits, suivis par les pulvérulents (ciment et/ou addition) et en dernier l'eau et l'adjuvant. La durée totale du cycle de malaxage couvre l'ensemble des opérations s'écoulant entre le début du remplissage de la cuve et la fin de vidange et sont divisé en trois parties : Le malaxage à sec, le malaxage humide et notamment le temps de malaxage, ces paramètres contrôlent l'évolution de l'homogénéité du mélange, quel que soit le type de malaxeur.

Pour assurer la réussite de cette opération en laboratoire, il est nécessaire d'adopter rigoureusement une même procédure de malaxage des mélanges afin d'avoir des matériaux

ayant des propriétés quasi constantes pour chaque gâchée. Cela concerne à la fois le temps de malaxage, la vitesse de malaxage et la séquence d'introduction des constituants dans le malaxeur.

### **1.3. Propriétés essentielles d'un béton ordinaire :**

Les propriétés essentielles pour le béton sont définies comme étant la qualité qui permet de garantir la facilité de sa mise en œuvre ; qualité sur laquelle repose différents aspects du béton une fois durci (résistance, enrobage des armatures etc.).

De plus, le béton est un matériau composite, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Il peut répondre à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, aspect, durabilité, sécurité incendie etc.

#### **1.3.1.A l'état frais :**

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend capable de remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité est également désignée sous les termes de maniabilité ou consistance du mélange.

L'ouvrabilité peut se définir comme l'aptitude que peut avoir le béton frais à bien se mettre en place pour le remplissage parfait du coffrage (sans ségrégation) et l'enrobage convenablement des armatures.

L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité, elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais

**(Gabrysia., 2007).**

De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité du béton ordinaire : nature et dosage en ciment, forme des granulats, granularité et granulométrie, méthode et durée de transport emploi d'adjuvants et bien entendu, dosage en eau. L'ouvrabilité a donc indirectement une conséquence sur le prix du béton. Plus l'ouvrabilité demandée est grande plus le béton contient d'eau et de ciment, plus son coût est élevé.

Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences sont : la diminution des résistances, un risque de ségrégation des constituants du béton...

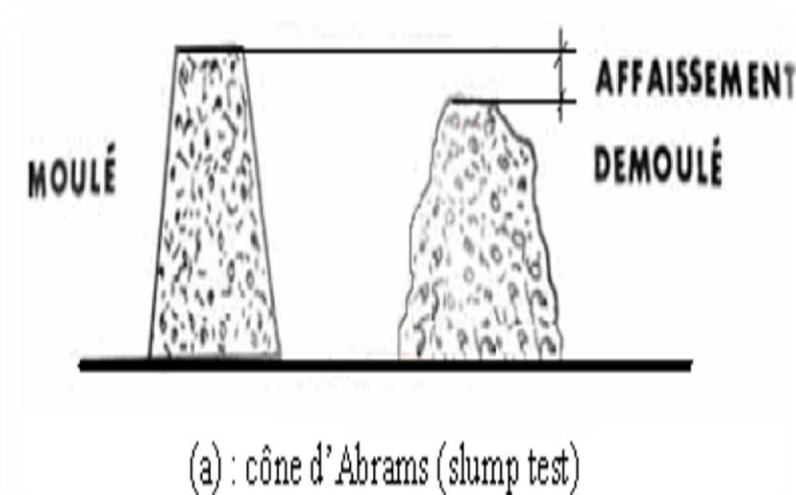
L'ouvrabilité est pour le béton une qualité fondamentale qui doit être très sérieusement prise en compte dans l'étude de composition d'un béton, la grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance, sa mesure peut être effectuée facilement sur le chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test » ou encore l'étalement « slump flow » pour les bétons fluides tels que les bétons autoplaçants.

### ❖ *Affaissement au cône d'Abrams* [NF P 18-451]

C'est l'essai le plus couramment utilisé car il est très facile à réaliser au laboratoire et au niveau des chantiers. Il est utilisable tant que la dimension maximale des granulats ne dépasse pas 40 mm. Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume de béton frais sous l'effet de son propre poids, ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. L'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance, plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

Selon la norme NF P 18 -451 l'essai consiste à remplir de béton un moule en tôle tronconique (base de diamètre 20 cm, partie haute de diamètre 10 cm et hauteur de 10 cm), le remplissage du cône est effectué en trois couches piquées avec une tige en acier de 16mm de diamètre et dont l'extrémité est arrondie, à raison de 25 coups par couche.

On soulève ensuite le moule avec précaution et on mesure l'affaissement. Cet essai est présenté dans la **Figure 1.1**.



**Figure 1.1.** Essai d'affaissement.

La norme NF EN 206-1 définit d'après l'affaissement, cinq classes de consistance des bétons représentées ci-dessous (Tableau 1.1)

**Tableau 1.1** : classe de consistance

Classe de consistance	Affaissement en cm
S1 (Ferme)	1 à 4
S2 (Plastique)	5 à 9
S3 (Très plastique)	10 à 15
S4 (Fluide)	16 à 21
S5 (Très fluide)	≥ 22

### 1.3.2.A l'état durci :

Le béton durci est défini comme un solide formé de granulats enrobés par une pâte de ciment. Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois. La caractéristique essentielle d'un béton à l'état durci est sa résistance à la compression à un âge donné. La connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul et le dimensionnement des ouvrages.

La résistance du béton à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. Cette résistance a été la plus étudiée, parce qu'elle projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, elle est directement liée à la structure de la pâte de ciment hydraté.

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci.

La résistance dépend d'un certain nombre de paramètres :

- l'âge et conditions de conservation,
- la pâte liante :
  - rapport eau/ciment,
  - type et dosage du ciment,
  - présence d'additions minérales,
- l'adhérence pâte-granulats,
- la résistance propre du granulat,
- la porosité du béton.

La résistance du béton en compression est une propriété qui continue d'augmenter plusieurs années après la production du béton. Le choix de réaliser le test à 28 jours d'âge n'est que purement normatif. Cette durée ne signifie pas que les réactions d'hydratation du ciment sont terminées.

#### ➤ *Essais de compression [NF EN 12390-4]*

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la compression. L'éprouvette est placée entre deux plateaux parallèles d'une presse rigide. La charge de rupture est la charge maximale enregistrée au cours de l'essai. La résistance à la compression est égale au rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette.

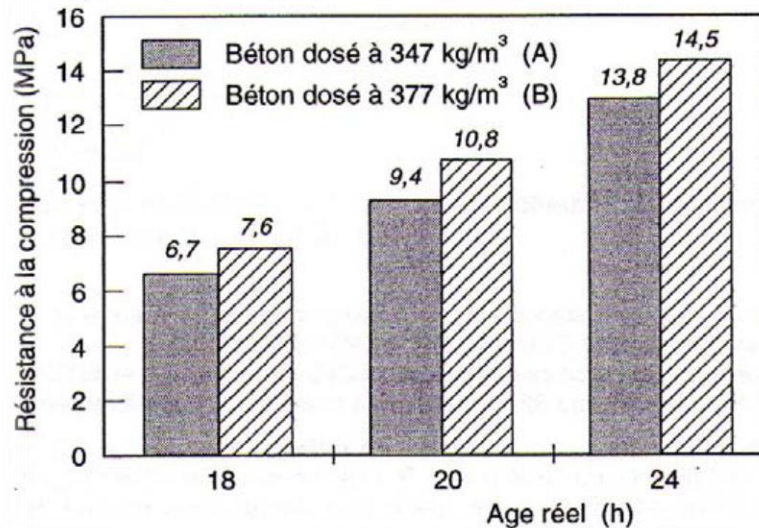
Le temps d'attente entre le moment où les éprouvettes sont sorties de l'eau et celui de l'exécution de l'essai de compression ne doit pas dépasser une heure, afin d'éviter la dessiccation des éprouvettes, sinon, des précautions doivent être prises.

## 1.4. Paramètres qui influent sur la résistance à la compression du béton :

### ❖ Influence du dosage en ciment

Pour un même dosage en eau, l'augmentation du dosage en ciment du béton aura pour conséquence de diminuer le rapport E/C du béton, ce qui se traduira nécessairement par une augmentation de la résistance à court et à long termes.

La **Figure 1.2** illustre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à court terme

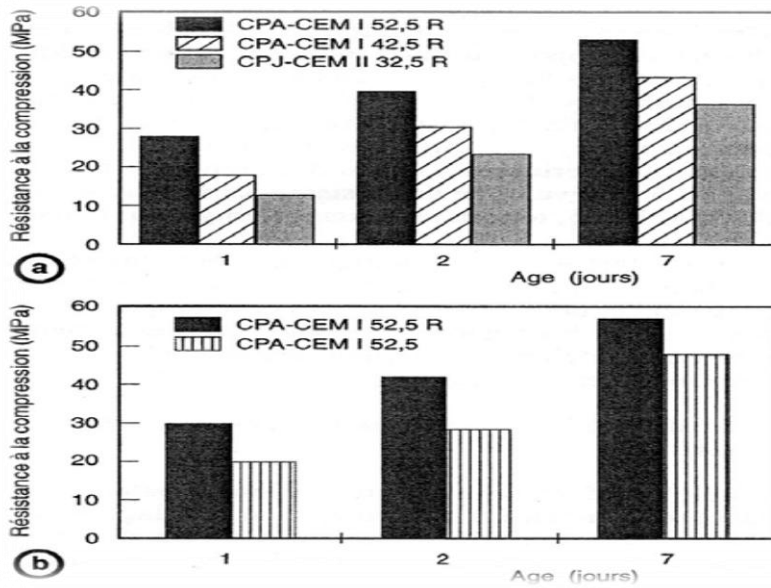


**Figure 1.2.** : Influence du dosage en ciment sur la résistance à la compression à court terme du béton (baron et al.,1996 cité par boukli 2010 )

Cette figure montre clairement l'accroissement des résistances d'un béton avec l'augmentation de son dosage en ciment.

La résistance d'un béton dépend aussi le type et la classe de résistance de ciment, plus cette classe est élevée, plus la résistance à la compression est élevée, à toutes les échéances.

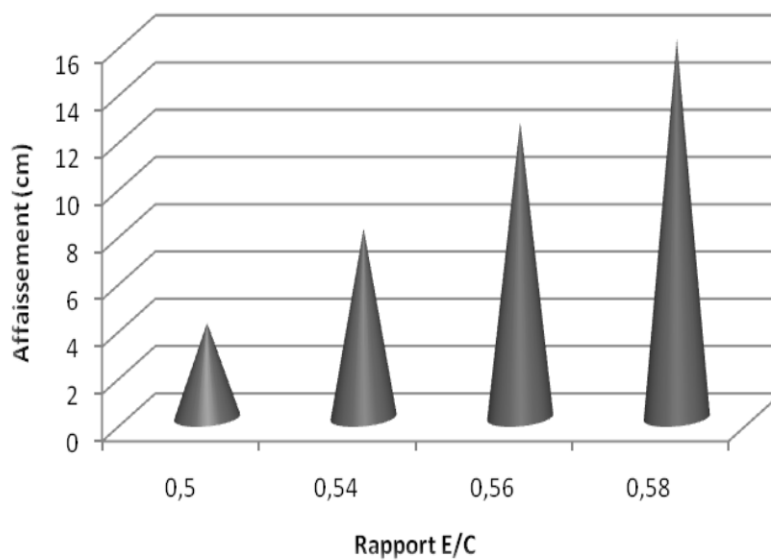
L'influence de ce paramètre sur la résistance à court terme est présentée sur la (**Figure 1.3**). Cette figure montre que le choix d'un ciment CPA-CEM I 52,5 R développera, à dosage identique dans le béton, des résistances à court terme considérablement supérieures à celles d'un ciment CPJ-CEM II 32,5 R. De même, un CPA-CEM I 52,5 R développe des résistances à court terme beaucoup plus rapidement qu'un CPA-CEM I 52,5, tout en présentant à 28 jours des résistances équivalentes



**Figure 1.3.** : Influence du type de ciment sur la résistance à la compression à court terme (baron, 1996)

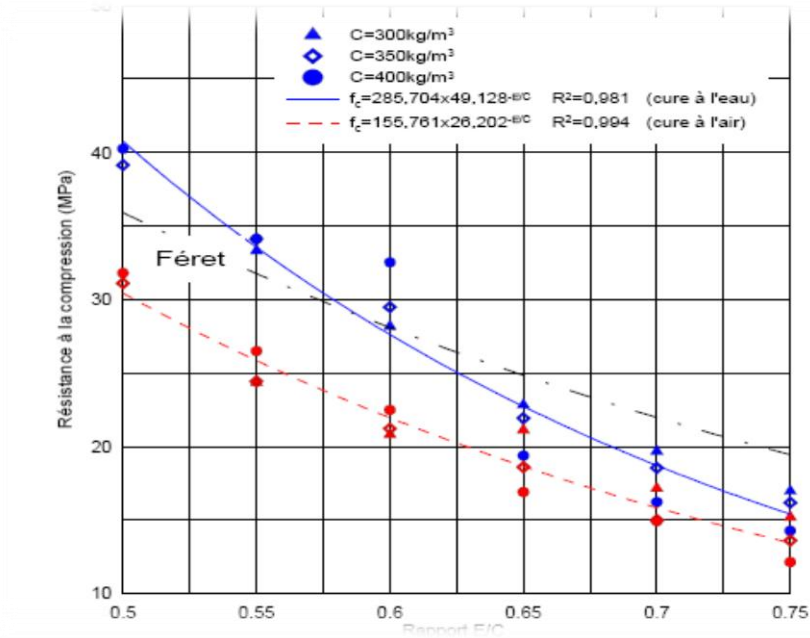
❖ **Influence du rapport eau/ciment**

La figure 1.4 montre l'évolution de la maniabilité en fonction du rapport E/C. Le constat général qui se dégage est que l'affaissement au cône augmente lorsque le rapport E/C croît.



**Figure 1.4.** : L'influence du rapport E/C sur la maniabilité (Mefteh et al., 2012).

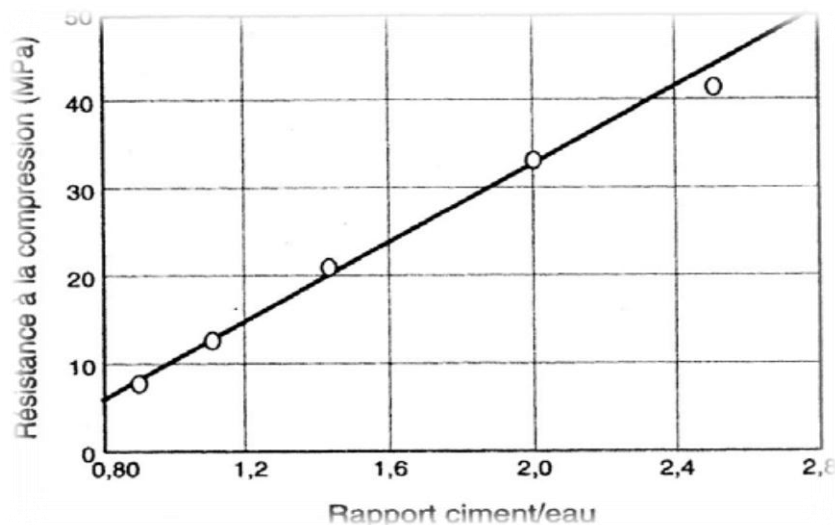
Le rapport E/C est le facteur le plus important qui conditionne la résistance à la compression d'un béton. **Boukli (2010)** a montré que la courbe représentant la résistance en fonction du rapport E/C a approximativement la forme d'une hyperbole et cette relation dépend très peu du dosage en ciment (**Figure 1.5**).



**Figure 1.5.** : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours et le rapport eau/ciment (boukli, 2010)

Pour un même dosage en ciment, l'augmentation du dosage en eau du béton aura pour conséquence d'augmenter le rapport E/C du béton, ce qui se traduira nécessairement par une diminution de la résistance.

Cependant d'autres auteurs (**Alexander et al ., 1982 ; Kakizaki, 1992**) ont montré que la relation était plutôt linéaire pour des valeurs du rapport C/E compris entre 1.2 et 2.5 (**Figure 1.6**).



**Figure 1.6.** : Valeurs des résistances en fonction du rapport C/E (neville, 2000)

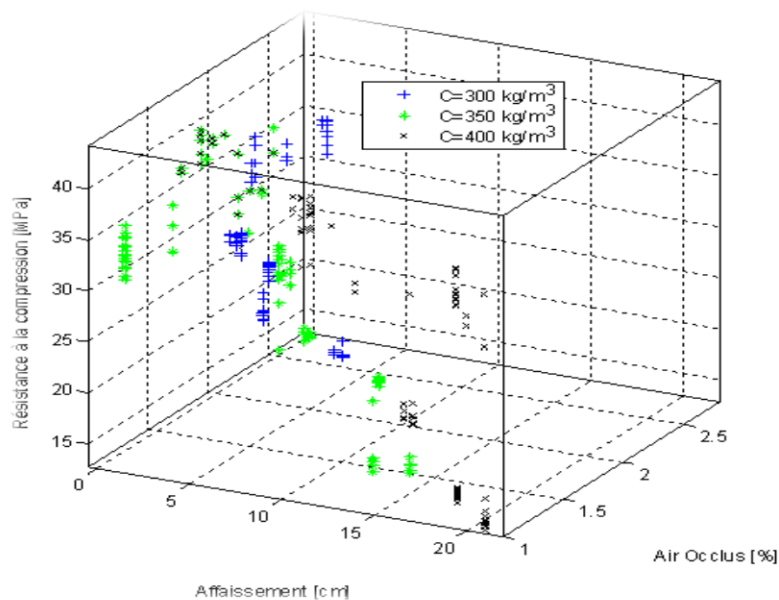
Il est clair que l'augmentation du dosage en eau entraîne la diminution de la résistance mécanique du béton à l'état durci.

Le dosage en ciment est très souvent relié aux propriétés mécaniques du béton et à sa durabilité. On considère aussi que l'écoulement et l'ouvrabilité du béton sont reliés au rapport E/C. La formulation des bétons ordinaires doit impérativement passer par l'optimisation de ces paramètres.

Le rapport E/C conditionne aussi la porosité de la matrice cimentaire du béton durci, qui est un paramètre qui influe beaucoup sur la durabilité du béton (Ollivier et al., 1992).

#### ❖ Influence de l'air occlus

L'air occlus est dû au volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans le béton après la mise en œuvre. Cette quantité d'air occlus dans le béton frais est mesurée à l'aide d'un aéromètre.



**Figure 1.7.** : Evolution de la résistance à la compression à 28j de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus (boukli, 2010) (belas belarbi, 2003)

La figure 1.7 montre l'évolution de la résistance à la compression à 28 jours de bétons conservés à l'eau en fonction de l'affaissement et du pourcentage d'air occlus. Il est clair, que le pourcentage d'air occlus décroît avec l'augmentation de l'affaissement qui est due à l'influence du rapport E/C, c'est-à-dire, lorsqu'on passe des bétons fermes aux bétons fluides. Cet air affectera aussi la résistance à la compression, lorsque la teneur en air augmente, la résistance à la compression des bétons diminue.

Le pourcentage d'air occlus est important dans les bétons fermes et varie entre 1% et 5%.

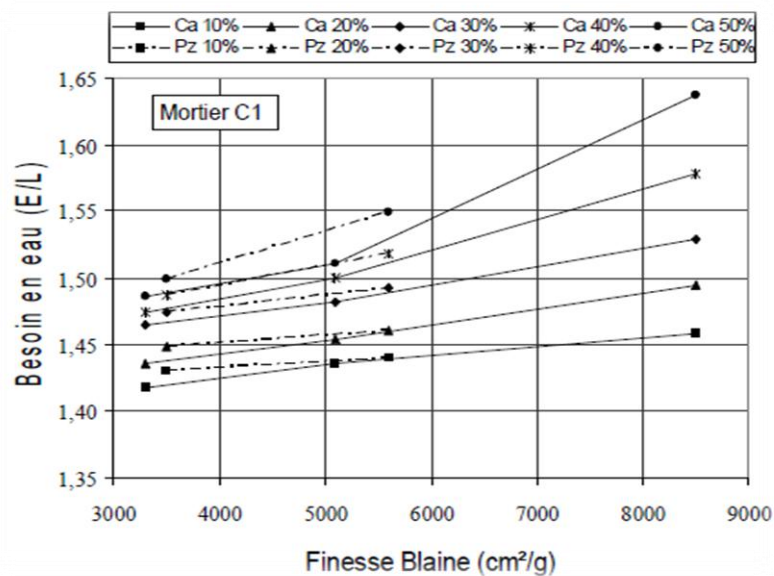
### ❖ Influence de la taille maximale du granulat $D_{max}$

Cette dimension dépend évidemment des dimensions de l'ouvrage, l'épaisseur de la pièce, l'ouvrabilité demandée, l'espacement et l'enrobage des armatures, la possibilité et l'efficacité du serrage à la mise en œuvre, risque de ségrégation, etc.

L'utilisation des granulats de dimension maximale contribue de façon très significative à l'augmentation de la résistance du béton.

### ❖ Influence des additions

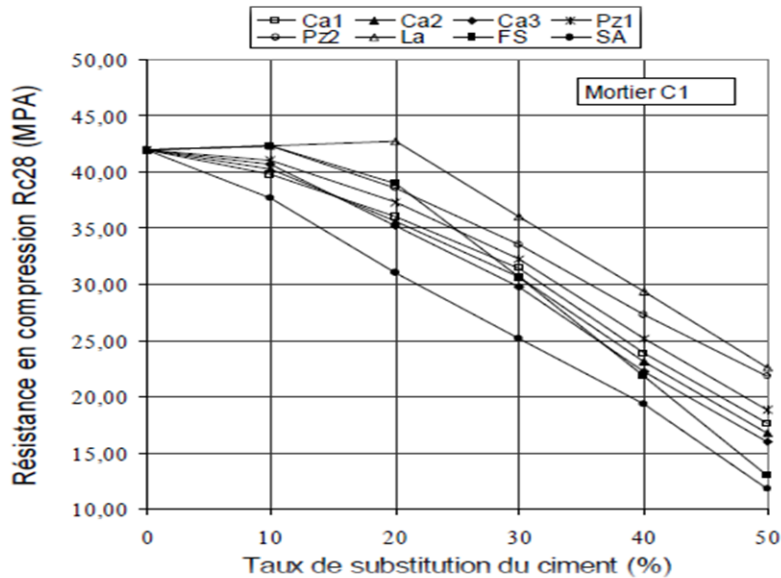
En général, l'augmentation de la quantité de particules fines dans un béton accroît la demande en eau pour le maintien de son ouvrabilité, puisqu'il faut davantage d'eau pour enrober et donc lubrifier les grains. Dans la mesure où cet ajout d'eau se fait au détriment des résistances mécaniques du béton, et que les superplastifiants (adjuvants fluidifiants) sont des produits relativement onéreux pouvant conduire à des effets secondaires en cas de surdosage, il convient de limiter le besoin en eau des fillers calcaires.



**Figure 1.8.** : Variation du besoin en eau des mortiers C1 (CPJ CEM II/A 42.5) en fonction de la finesse des additions (Boudchicha ., 2007).

Boudchicha (2007) a remarqué que le besoin en eau des mortiers avec additions est d'autant plus important que la finesse des particules d'additions est grande, et il est d'autant plus important que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand. Ceci peut être parfaitement expliqué par le fait que l'introduction des additions minérales de finesse plus importante que celle du ciment utilisé, entraîne une augmentation de la surface à lubrifier.

Le besoin en eau est plus important pour les mortiers avec additions de pouzzolanes que pour les mortiers avec additions calcaires, ceci est d'autant plus vrai que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand et que la finesse de l'addition est importante.



**Figure 1.9.** : Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers C1 (CPJ CEM II/A 42.5) en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition (Boudchicha ., 2007).

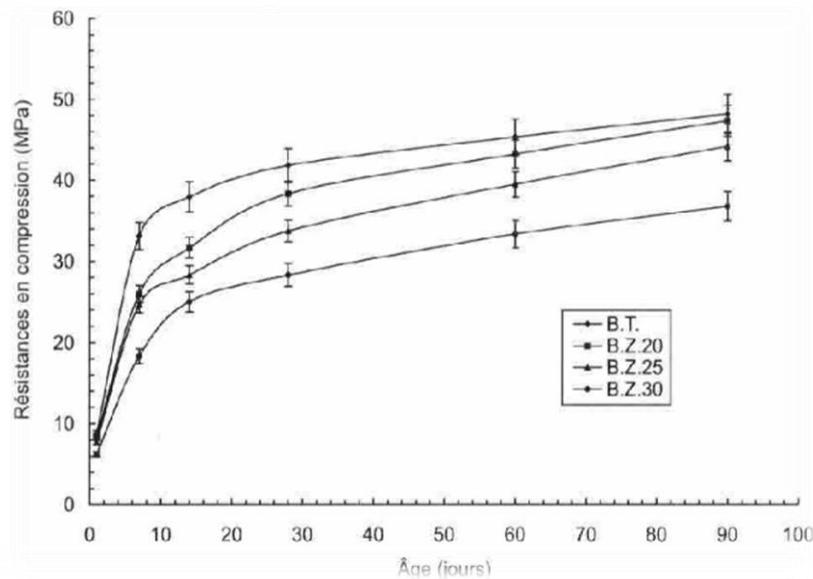
La figure **Figure 1.9** montre que lorsque le taux de substitution du ciment par l'addition augmente, la résistance diminue.

**Goufi et col. 2011**, ont fait une étude sur l'effet de la pouzzolane de Beni- Saf sur la durabilité des bétons. Cette étude fait état des résultats expérimentaux permettant l'évaluation de la durabilité du béton contenant une pouzzolane naturelle Algérienne.

Les résultats obtenus aux cours de cette étude ont montré que cette pouzzolane, utilisé en remplacement d'un ciment de type CEM II/A, permet de maintenir les mêmes performances que lorsque ce ciment est utilisé seul. Ces performances sont principalement dues à la modification de la microstructure de la pâte de ciment dans le sens d'un accroissement de compacité.

Même après 90 jours de conservation dans un milieu plus ou moins agressif (sulfates), les caractéristiques des bétons pouzzolaniques ne sont pas affectées par les dégradations, à cause de la compacité très élevée qui empêche la pénétration des agents agressifs. Ainsi, les résultats de cette étude montrent la nécessité d'utiliser la pouzzolane naturelle de Béni Saf en substitution au ciment vu que, les performances mécaniques des bétons dans lesquels elle a été incorporée restent analogues sinon meilleures à celles d'un béton témoin d'où un avantage économique et écologique considérable.

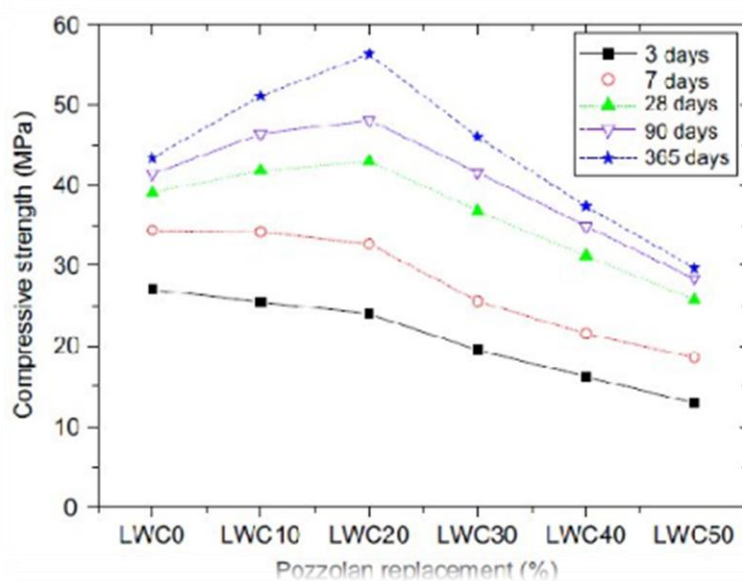
La **Figure 1.10** présente l'évolution des résistances mécanique en compression des bétons à la pouzzolane naturelle, suivant des proportions variantes à hauteur de (0%, 20%, 25%, et 30%).



**Figure 1.10.** : Comparaison des évolutions des résistances en compression B.T, béton témoin ; B.Z., 20, 25, 30, béton à base de ciment pouzzolanique à un dosage de 20, 25, ou 30 % de pouzzolane (belas belarbi, 2003).

D'après la **Figure 1.10** on remarque l'augmentation de la résistance mécanique aux différents âges de durcissement pour tous les bétons pouzzolaniques. Le pourcentage de 20 % donne, à long terme, des performances mécaniques pratiquement analogues à celles du béton témoin (belas belarbi, 2003) (mouli, 2008)

La **Figure 1.11** présente l'effet du taux de substitution du ciment par de la pouzzolane sur la résistance à la compression des bétons aux différentes échéances.



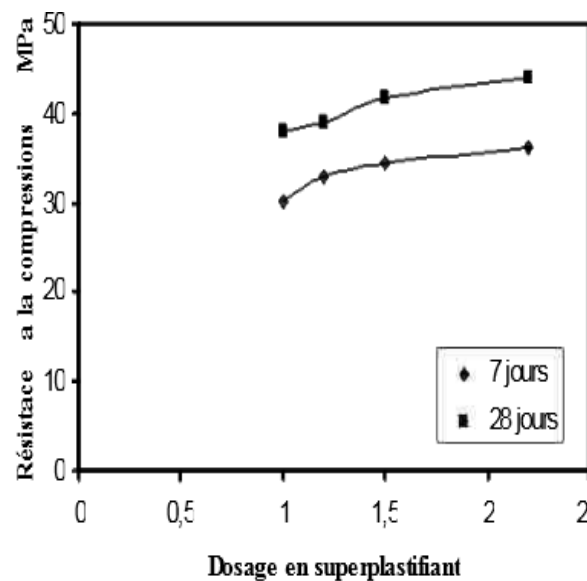
**Figure 1.11.** : Effet de la pouzzolane sur la résistance à la compression (mouli, 2008)

Les résultats illustrés par cette courbe montrent l'évolution des résistances en compression durant les échéanciers de 3, 7, 28, 90 et 365 jours et prouvent encore une fois que l'incorporation de 20% de pouzzolane comme ajout cimentaire donne les plus grandes résistances par rapport au béton témoin après 7 jours jusqu'à 365 jours. L'ajout de 30% de pouzzolane développe des résistances acceptables, mais à partir de 90 jours et plus par rapport au béton témoin.

On remarque que les pourcentages de 40% et 50% de pouzzolane affichent les résistances les plus faibles pour tous les âges et donc doivent être évités.

#### ❖ Influence des adjuvants

La **Figure 1.12** montre la variation de la résistance à la compression en fonction du dosage en superplastifiant avec un rapport E/C égal 0.55.



**Figure 1.12.** : Variation de la résistance à la compression d'un béton adjugé  
(Adjoudj et col., 2009).

L'incorporation du superplastifiant a amélioré l'ouvrabilité et la résistance du béton à la compression grâce à une meilleure défloculation du ciment et donc une hydratation plus poussée.

## **1.5. Conclusion :**

Dans ce chapitre, une revue générale sur le matériau béton et l'influence des différents constituants sur ce dernier à l'état frais et durci a été présentée. Il est clair que chaque constituant a une influence non négligeable sur l'ouvrabilité et la résistance du béton.

Par ailleurs, il est aussi possible d'étudier le comportement mécanique du béton grâce à des essais non destructifs qui seront réalisés lorsqu'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.

Le chapitre suivant détaillera les essais non destructifs et les essais destructifs les plus utilisés dans le domaine des matériaux de construction.

## CHAPITRE 2

### METHODE DE CONTROLE DU BETON

#### 2.1. Introduction

Lors de la réalisation des ouvrages en béton armé, on assiste à plusieurs problèmes qui sont liés à la qualité du béton notamment à la résistance de ce matériau). La résistance du béton peut être caractérisé en utilisant plusieurs essais normalisés par la norme nationale IANOR ou internationales comme la norme Afnor. Ces essais sont réalisés soit des essais destructifs tel que l'essai de compression traditionnel soit sans procéder à la destruction de l'élément comme les essais d'homogénéités de surface où les essais de la surface superficielle du béton (attique, 2021)

#### 2.2. Evaluation De La Résistance sur Site

La résistance du matériau béton sert au calcul du dimensionnement des ouvrages en béton armé ou pour étudier la durabilité de ce matériau. (Harride., 2016)

En Algérie, la résistance a la compression sur site est évaluée en utilisant la norme NF EN 13791 « évaluation de la résistance a la compression sur site des structure des et des éléments prefabrique en béton ».

Cet essai est réalisé sur des éprouvettes normalisées qui sont confectionnées au laboratoire ou sur des carottes qui sont prélevées directement sur le site (attique, 2021)

Dans ce chapitre on va intéresser à l'éducation de la déférente méthode directe et indirecte

#### 2.3. Contrôle par les méthodes non destructifs

##### 2.3.1. L'ultrason

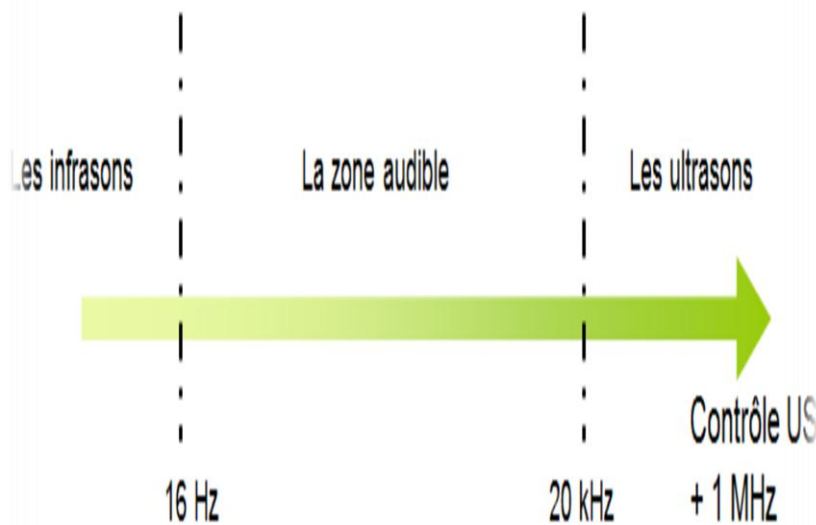
###### *2.3.1.1. Définition*

L'essai d'ultrason ou d'ondes ultrasonores est un essai non destructif). Il permet d'avoir une appréciation de la résistance à la compression par l'utilisation des relations des corrélations qui relie la résistance avec la vitesse de propagation des ondes acoustiques (ultrasonores) (attique, 2021)

$$R = 0,525 \exp (0,880 V)$$

L'essai d'homogénéité de surface est destiné à la mesure du temps de parcours d'une onde acoustique qui se propage dans un milieu qui a des propriétés d'une onde élastique.

L'onde ultrasonique a une fréquence supérieure à celle de la zone audible. Elle est comprise entre 25 kHz et 1 GHz (voire la figure 2.1.), (Hannachi., 2015)



**La figure 2.1. : les différentes ondes acoustiques et leur fréquence (bouakeze ., 2012)**

Le critère évolutif du matériau isotrope béton au cours du temps conduit à une nécessité d'un contrôle continu et permanent car il y a une présence de l'hétérogénéité de ces constituants (agrégats, ciments, eau, adjuvants minérale et organique). L'utilisation des contrôles indirects qui se basent sur la propagation d'une onde acoustique aide à contrôler cette évolution au fil du temps. L'essai d'homogénéité de surface peut ainsi être utilisé dans le but de tester un échantillon à plusieurs reprises et dans le même endroit, ce qui aide à une surveillance stricte du béton qui peut subir des changements structurels internes au cours du temps. (Benmammar, 2019)

L'essai ultrasonique aide à la détection de plusieurs caractéristiques du béton durci comme le degré de compacité, l'homogénéité (par la détection des vides, délaminage et des microfissures,...).

### **2.3.1.2. Objectifs de la méthode (attique, 2021)**

L'essai des ondes ultrasoniques se réalise dans le but :

- La recherche de l'hétérogénéité ou les discontinuités dans les structures en béton ,
- Estimer la résistance à la compression.

### **2.3.1.3. Domaine D'application**

- L'essai de propagation d'onde acoustique est utilisable dans le cas où il s'agit des structures en béton ayant au moins une face accessible .
- Dans le cas où on veut effectuer un contrôle de la qualité de béton (résistance à la compression selon la formulation et l'âge du béton) (hannachi, 2015)
- Dans le cas où on veut effectuer des recherches sur les désordres ou expertiser la structure : hétérogénéité comme la discontinuité, les vides , les microfissures (selon la norme NF EN 12504-4)

- Lorsqu'il y a une présence de chocs thermiques où attaques chimiques qui provoquent des dégradations, la détermination des plans et profondeur de ces derniers se réalise en utilisant l'essai d'ultrason.

#### 2.3.1.4. Avantages et inconvénients de l'ultrason

##### a) les avantages

- ✚ La géométrie de l'élément ausculté n'est pas importante. L'essai peut être appliqué sur n'importe quelle géométrie, (Benmammar, 2015)
- ✚ la rapidité dans l'exécution de l'essai. (attique, 2021)
- ✚ Méthode d'identification se caractérise par la fiabilité, sans procéder à la destruction d'un ouvrage (attique, 2021)
- ✚ Les profils de dégradation en profondeur peuvent être élaborés
- ✚ Possibilité d'établir une cartographie qualitative et quantitative des milieux auscultés
- ✚ On peut à travers cette méthode de déduire la qualité du béton en utilisant le champ de la vitesse comme le montre le tableau suivant (Harride., 2016)

Tableau 2.1 : La qualité du béton en fonction de la vitesse (Harride., 2016)

<u>Intervalle de vitesse</u>	<u>La résistance</u>
<u>2500 m/s &lt; V &lt; 3200 m/s</u>	<u>Béton de faible résistance</u>
<u>3200 m/s &lt; V &lt; 3700 m/s</u>	<u>Béton de moyenne résistance</u>
<u>3700 m/s &lt; V &lt; 4200 m/s</u>	<u>Béton a haute résistance</u>
<u>V &gt; 4200 m/s</u>	<u>Béton a tres haute résistance</u>

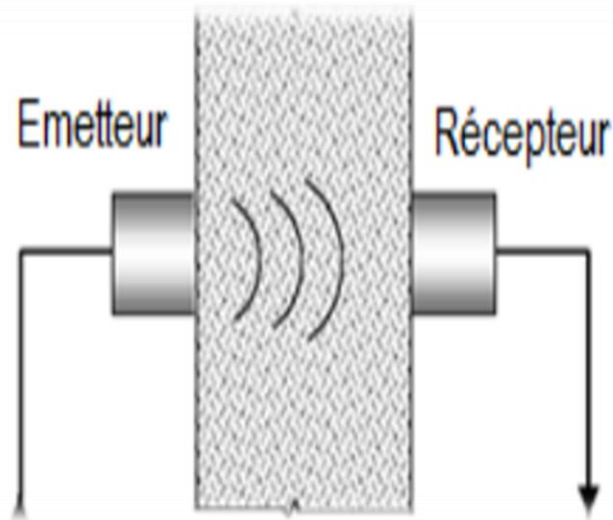
##### b) Les inconvénients

- Il faut avoir de l'expérience de l'analyse et du traitement du signal pour l'interprétation des résultats.
- Il est déconseillé d'utiliser cette méthode de contrôle dans le cas où il s'agit des bétons qui sont fortement ferrailés. car la méthode d'auscultation sonique (auscultation par ultrason) fonctionne mal dans ce cas
- Il est nécessaire de connaître les constituants du béton pour une meilleure expertise. (attique, 2021)
- Les éléments utilisés dans cet essai doit avoir une épaisseur qui dépasse 50 mm à cause di transducteur.
- La présence de la glace et de l'eau dans un matériau poreux peut modifier les caractéristiques physiques initiales et compliquer l'exploitation des résultats, ce qui conduit à une impossibilité pour ausculter le matériau

#### 2.3.1.5. Principe de l'essai

L'essai de propagation d'onde ultrasonore permet à travers les ondes qui se propagent à l'intérieur du béton par une certaine vitesse d'évaluer le temps du parcours. La figure 2.2 résume le principe (bouakkeze, 2011)

**Selon la norme NF EN 12504-4**, La génération et la réception d'une onde se fait par l'utilisation d'équipements spécifiques. Le premier équipement conduit à la génération d'une onde acoustique, est appelé le transducteur-émetteur alors que le deuxième qui a la responsabilité de recevoir l'onde ultrasonore est nommé le transducteur-récepteur. Ces équipements sont placés sur la surface du matériau à ausculter.



**La figure 2.2. : Le principe de méthode de propagation** (bouakkeze, 2011)

La détermination de la vitesse d'onde ultrasonore se fait par utilisation d'une formule physique en fixant au départ la distance du parcours. (boukli h. s., 2020) Cette relation est :

$$V = d/t$$

Où V : représente la vitesse de propagation d'onde en (m/s)

t : représente le temps de parcours en (s)

d : représente la longueur de parcours en(m) cette longueur est fixe au départ

**Selon la RILEM**, L'appréciation de la résistance à la compression se fait par l'utilisation des courbes qui relient la vitesse d'onde ultrasonore à la résistance à la compression. (Harride., 2016)

**a) Préparation du matériau** (attique, 2021)

On utilise certains produits tel que la vaseline ou un savon liquide ou encore une pate constituée de kaolin et de glycérol dans le but d'assurer un meilleur contact entre le transducteur (émetteur ou récepteur) et la surface d'un matériau testé. Il faut s'assurer que l'instrument de mesure est bien appliqué sur la surface à tester.

Dans le cas où il s'agit une surface assez rugueuse, il est recommandé de traiter la partie de la surface où les transducteurs vont être disposés.

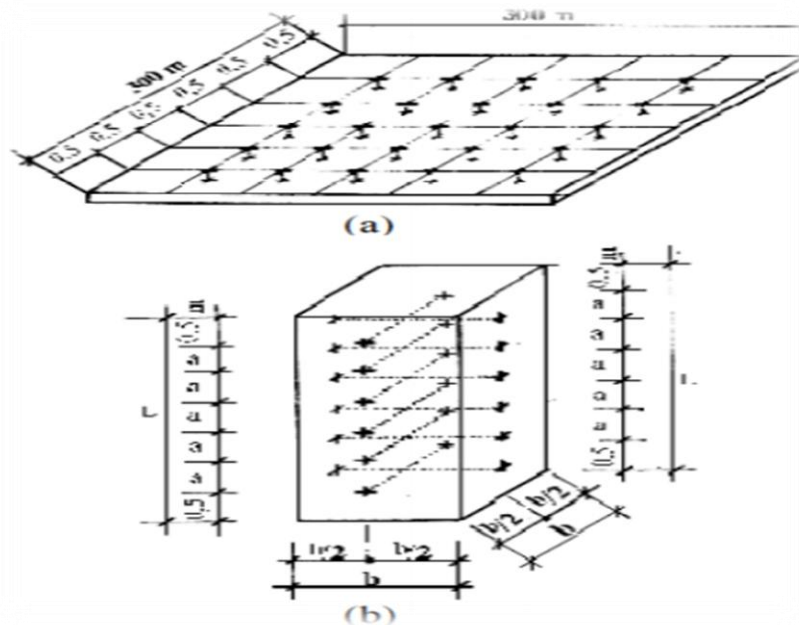
**b) Points de mesure** (magramons, sans date)

Les dimensions d'ouvrage à ausculter influent sur le nombre des points où il faut effectuer la mesure. Dans le cas où il s'agit d'un grand panneau comme les dalle les points de mesure situent au niveau d'intersection d'un quadrillage d'une maille de 0.5 m. Par contre, dans le cas

des petits éléments telles que les éprouvettes, six points sont à identifier avec des cotes (a) et (b) définis comme suit (figure 2.3.):

- a : un panneau (exemple : une dalle de 3x3 m<sup>2</sup>)
- b : un petit élément (exemple : en poteau de section bxb et de hauteur h)

(voir la figure 2.3)

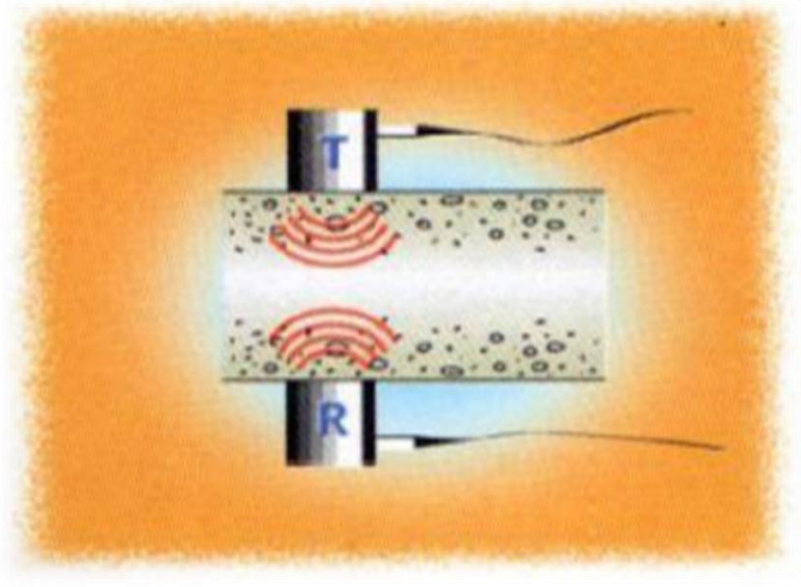


**Figure 2.3. : Les points des mesures** (magramons, sans date)

Lors de l'auscultation sonique, la distance minimale de parcours joue un rôle : à titre exemple lorsqu'on utilise la méthode de transmission directe, on a une distance de parcours qui va dépasser de 150 mm et dans le cas où on utilise la méthode de surface la distance de propagation d'onde acoustique va dépasser 400 mm, cette dernière méthode ne peut pas donner des informations concernant la couche base du béton (magramons, sans date)

❖ **mesure en transparence directe** (Harride., 2016)

Cette méthode se réalise par la disposition des transducteurs (émetteur et récepteur) dans des positions qui sont oppose et la distance de propagation. Cette méthode est applicable dans le cas où il s'agit des deux faces qui sont accessible comme une éprouvette, poteaux ou dans certaines poutres (figure 2.4)

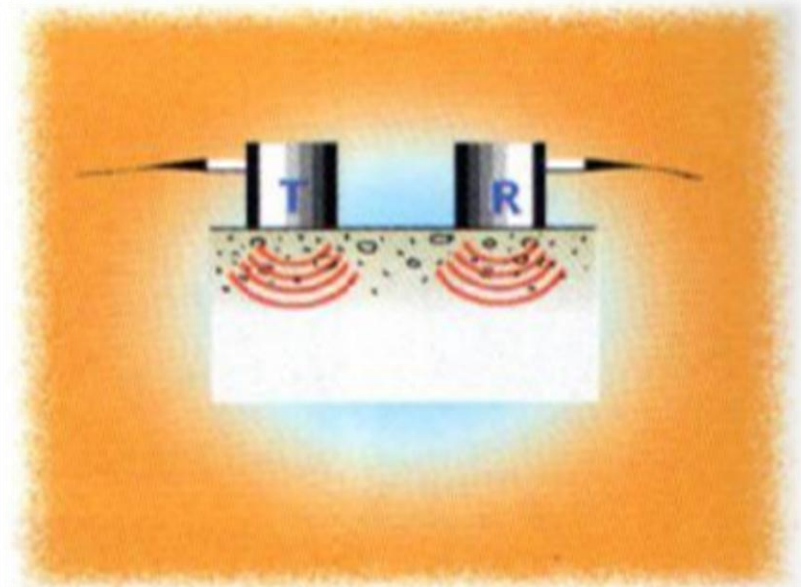


**Figure 2.4. : Mesure transparence** (Harride., 2016)

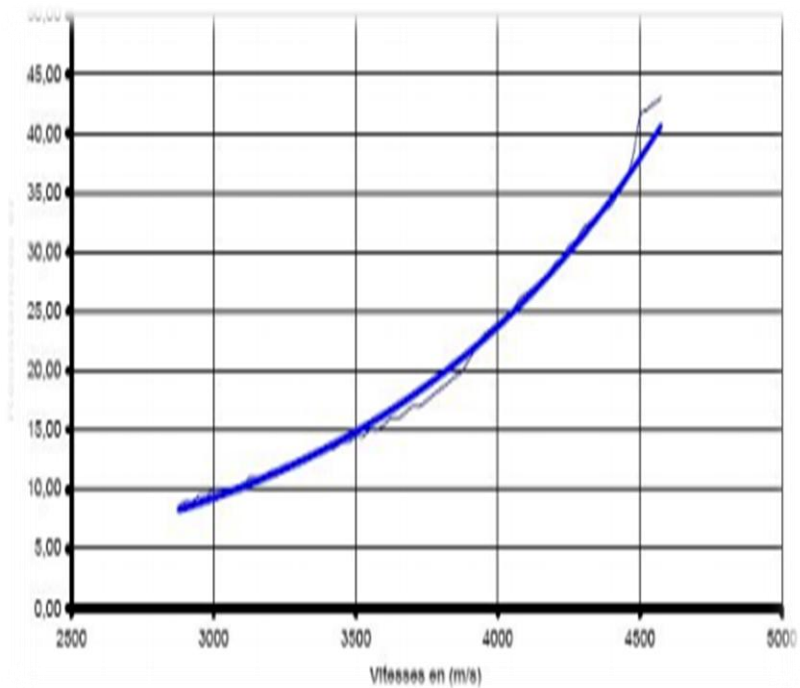
❖ *mesure en surface* (Harride., 2016)

Cette méthode est réalisée par la disposition des transducteurs (récepteur et émetteur) dans la même position de surface d'un matériau ausculté. Si on veut utiliser cette méthode, on fixe le transducteur –émetteur qui sera utilisé dans le but de la génération d'une onde acoustique et on fait déplacer le transducteur –récepteur à des distances connues au départ, le passage d'un point à un autre se fait après le relevage du temps correspondants le point précédent (Figure 2.5)

Dans le but de déterminer la vitesse, on procède à tracer une droite qui relie la distance avec le temps de parcourt et la pente représente la valeur de la vitesse (Figure 2.6)



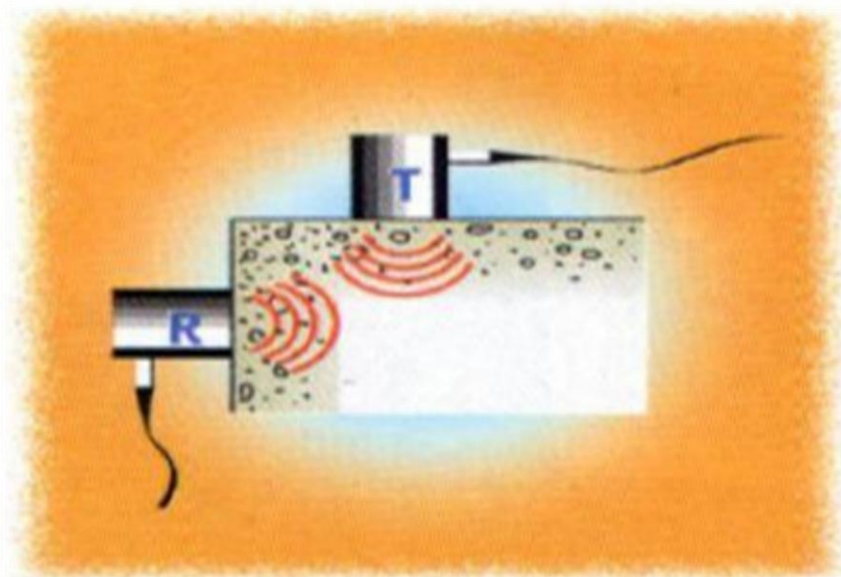
**La figure 2.5. : mesure en surface** (Harride., 2016)



**Figure 2.6. : Vitesse en fonction du parcours (Harride., 2016)**

❖ *la méthode par semi transparence* (attique, 2021)

Cette méthode se fait par la disposition des transducteurs (émetteur et récepteur) sur deux faces de matériaux à ausculter qui sont non coplanaire (figure 2.7). cette méthode est applicable dans le cas où il s'agit de grands éléments comme les piles d'un pont .



**La figure 2.7. : méthode semi transparence (Harride., 2016)**

### **2.3.1.6. Paramètre qui influe sur la vitesse d'une onde ultrasonores**

Une onde ultrasonore est générée par un émetteur et va parcourir une certaine distance avec une vitesse connue. Cette vitesse peut être affectée par certain paramètre comme :

- Le module d'élasticité des granulats et leur quantité dans le béton (Harride., 2016)
- Le dosage en ciment
- La modification de la pâte du ciment lors de durcissement.
- La granulométrie des constituants
- L'humidité de béton
- La maturité de béton
- Les adjuvants
- La disposition et le nombre des armatures (magramons, sans date)
- L'enrobage.

Dans le cas où il s'agit d'un béton armé, la vitesse de propagation est plus élevée à coté des armatures par rapport au béton. À noter que la vitesse de propagation dans les aciers est 1.2 à 1.9 fois plus grande que celle du béton non armé. (magramons, sans date)

- ***influences du rapport E/C sur la vitesse de propagation*** (Harride., 2016)

Il y a une relation inversement proportionnelle entre la résistance à la compression et le rapport E/C donc on a une relation inversement proportionnelle entre la vitesse et le rapport E/C

- ***Age du béton*** (Hannachi., 2015)

Au début on a une augmentation de la vitesse de propagation assez rapide, puis on assiste à une stabilisation de cette dernière.

- ***Température de béton*** (Harride., 2016)

La température peut influencer sur le durcissement di béton et donc sur la vitesse de propagation de l'onde acoustique.

### **2.3.2. le scléromètre ou rebond hammer**

Dans le but d'apprécier la résistance à la compression, le scléromètre utilise deux méthodes :

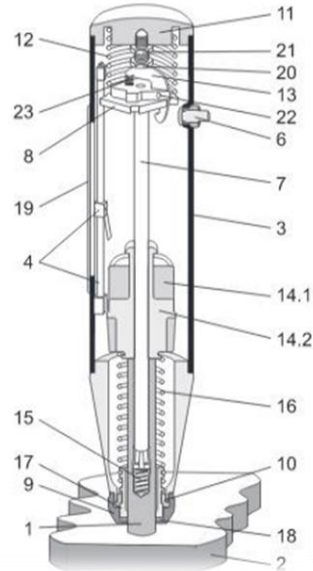
#### ***2.3.2.1. La méthode d'indentation***

Cette méthode est effectuée par l'utilisation d'indenter afin d'appliquer une charge à la surface des matériaux béton qui va se déformer de manière élasto-plastique lors de l'indentation. (Hannachi., 2015)

La méthode de la dureté de surface superficielle donne une résistance à la compression qui équivaut à 80% de la résistance réelle à cause de l'influence de plusieurs paramètres (l'âge de béton.....) (attique, 2021) la figure 2.8 représente le scléromètre et ces constituants



- 1 Tige de percussion
- 2 Surface à examiner
- 3 Bâti
- 4 Repère avec tige
- 5 sans affectation
- 6 Bouton-poussoir complet
- 7 Barre de glissement
- 8 Disque de guidage
- 9 Calotte
- 10 Anneau de pression
- 11 Couvercle
- 12 Ressort de pression
- 13 Verrou
- 14 Marteau: 14.1 modèle N, 14.2 modèle L
- 15 Ressort amortisseur
- 16 Ressort de frappe
- 17 Douille
- 18 Rondelle de feutre
- 19 Fenêtre en plexiglas
- 20 Vis
- 21 Contre-écrou
- 22 Goupille
- 23 Ressort verrouilleur



**La figure 2.8. : les constituants de scléromètre** (Hannachi., 2015)

Les tableaux 2.2 représente l'énergie de l'impact en fonction de type de recul et 2.3 représente le type de recul en fonction de moyenne de mesure

Le tableau 2.2. : Énergie de l'impact en fonction de type de recul (magramons, sans date)

type de recul	énergie d'impacte (kgf.m*)	Domaine d'utilisation
linéaire	0.075	- éléments minces en béton - béton à base d'agrégats légers
	3.000	Eléments massif
	0.225	Béton usuel
	0.225	Contrôle de la qualité du béton sous l'eau
	0.225	Identique au modèle N mais avec un dispositif d'enregistrement des mesures
	0.075	contrôle de la qualité des produits en terre cuite (particulièrement des tuile)

angulaire	0.090	*éléments ayants des dimensions transversales réduites *béton et enduit de moindre résistance
	0.090	Contrôle de la qualité des matériaux de très faible RC

**Tableau 2.3. : Les moyennes des mesure en fonction de type de recule** (magramons, sans date)

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

### 2.3.2.2. *Fonctionnement du scléromètre*

Le scléromètre est caractérisé par la présence d'un marteau et un ressort à l'intérieur du dispositif, alors qu'un abaque qui permet d'estimer la dureté du matériau testé est fixé sur lesla paroi extérieure du scléromètre. La tige en acier est appuyée perpendiculairement sur le béton qui pousse à comprimer le ressort. Ce dernier conduit à la naissance d'une énergie de l'impact qui va rebondir avec une certaine amplitude en fonction de l'énergie de recul. Un rebondissement élevé est signe d'une bonne résistance du béton. (attique, 2021)

### 2.3.2.3. *Objectifs essai de scléromètre*

- ❖ L'essai du scléromètre permet d'apprécier la résistance à la compression (Harride., 2016)
- ❖ Evaluation de la dureté et l'homogénéité de surface d'un parement en béton (attique, 2021)
- ❖ Délimitation de la zone dégradé ou de la zone qui présente des caractéristique mécanique différentes

### 2.3.2.4. *Avantage et inconvénient d'essai du scléromètre*

#### a) *Avantages*

- ❖ Simple à réaliser. (Hannachi., 2015)
- ❖ Convention automatique dans l'unité de mesure désirée (MPA, PSI) (article)
- ❖ La courbe de convention est établi pour large gamme de béton. (article)

### ***b) Inconvénients***

- Ne permet pas de corrélérer directement la dureté de la surface du matériau ausculté avec la résistance à la compression,
- Nécessite plusieurs essais pour avoir les résultats.
- Il est nécessaire de procéder périodiquement au tarage de scléromètre
- il est nécessaire de préparer la surface du matériau.
- L'indice sclérométrique ou le rebondissement dépend de la température et l'humidité

#### ***2.3.2.5. Les facteurs qui influés sur essai au scléromètre (Hannachi., 2015)***

- La texture de la surface,
- la dimension, la forme et la rigidité de l'échantillon,
- la régularité de la surface
- le degré d'humidité du béton
- le type de ciment
- la taille de plus gros granulats
- le degré de carbonatation de surface
- l'âge et l'humidité du béton,

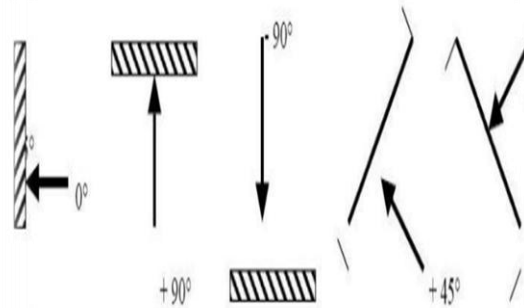
#### ***2.3.2.6. Principe d'essai au scléromètre***

L'essai du scléromètre est basé sur le principe de la capacité d'un mâtèreau à absorber l'énergie d'un choc en se déformant. Ce principe est connu sous le nom du principe de résilience. Il permet d'apprécier la résistance à la compression de béton en mesurant la résistance de la peau du parement du béton, connu aussi sous le nom de la dureté de surface superficiel. (attique, 2021)

En effet, l'indice sclérométrique est déterminé par la projection d'une masselotte chargée par un ressort sur une tige métallique en contact avec la surface de béton. Cette valeur dépend de certains paramètres tel que l'angle de l'inclinaison de l'appareil par rapport à l'horizontal ainsi que la dureté de surface. L'essai est normalisé par la norme NF EN 12504-2. A partir de cet indice, il est possible d'avoir une idée sur la qualité du béton ainsi que sa résistance à la compression à l'aide d'une échelle gradué fixée sur le scléromètre (magramons, sans date)). La résistance à la compression a une relation proportionnelle avec l'indice de rebondissement c.à.d. une augmentation de l'indice conduit à une augmentation de la résistance à la compression (Hannachi., 2015), la correction de la valeur de l'indice de rebondissement se diffère selon l'angle d'inclinaison. Cette correction est illustrée. Le tableau 2.4. Donne les corrections sur l'indice sclérométrique en fonction de l'angle. (magramons, sans date)

**Tableau 2.4. : Correction de la valeur de l'indice de rebondissements en fonction d'angle de l'inclinaison (magramons, sans date)**

Indice de rebondissement	Correction de l'indice de rebondissement pour les différents angles d'inclinaison de l'appareil			
	Essai vers le haut		Essai vers le bas	
	+90°	+45°	-90°	-45°
20	Non valable	Non valable	+2.4	+3.2
>20	-5.4	-3.5	+2.4	+3.4
>30	-4.7	-3.3	+2.3	+3.1
>40	-3.9	-2.0	+2.0	+2.7
>50	-3.1	-2.1	+1.6	+2.2



**La figure 2.9. : éléments a testé par scléromètre (magramons, sans date)**

Il est aussi important de rappeler qu'il est nécessaire de procéder au nettoyage des surfaces d'impact, l'enclume de référence ainsi que la tige de percussion avant d'effectuer la série d'essais sur le béton. (attique, 2021)

Pour le nettoyage de la surface du béton testé, il ne faudra pas avoir aucune présence de nid de graviers, des écaillages, de texture grossière, de porosité élevée ou d'armatures affectant cet essai. (attique, 2021)

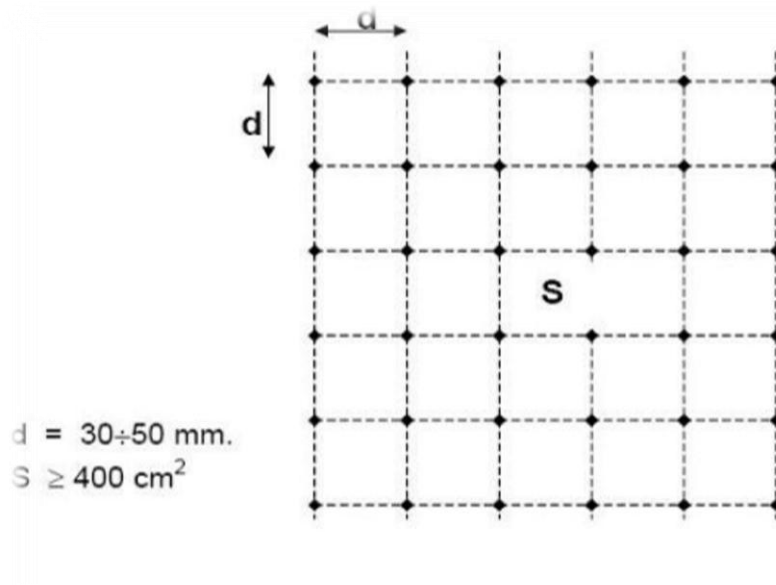
L'opération de la surface est destinée à l'élimination de tout produit qui peut influencer sur les résultats tels que les enduits, les peintures adhérentes ou s'il s'agit d'une couche superficielle friable. On doit aussi procéder à l'essuyage de toute trace d'eau sur la surface. (attique, 2021)

De plus, avant l'essai, l'étalonnage de l'appareil doit être fait.

❖ **Points de mesure** (Harride., 2016)

Vingt-sept (27) mesures doivent être effectuées sur la paroi du béton. Dans ce cas, il est recommandé de diviser une surface de mesures de plus de 400 cm<sup>2</sup>. Chaque zone est structurée en un grillage de points de mesures ayant pour espacement de maillage d=30/50 mm,

Les points de mesure qui sont à l'extrémité de la surface doit être au plus de 30 mm par rapport aux bords de la surface (la figure 2.10)



La figure 2.10. : Grille de mesure sur l'ouvrage (magramons, sans date)

## 2.4) Contrôle par les méthode destructifs

### 2.4.1) Essai de compression traditionnel

#### *2.4.1.1. Introduction*

L'essai destructif par compression traditionnel peut être réalisé soit sur des éprouvettes normalisées fabriquées au laboratoire (Harride., 2016), ou sur des carottes qui sont prélevées directement du site. Cet essai est effectué par l'utilisation d'une machine hydraulique nommée la presse hydraulique (figure 2.11) (attique, 2021)



La figure 2.11. : La machine de compression traditionnelle

#### **2.4.1.2. Les domaine d'utilisation de l'essai**

L'essai de compression traditionnel permet de déterminer la contrainte de compression nécessaire pour avoir à un écrasement de l'éprouvette qui conduit à la rupture de l'éprouvette (figure 2.12) par l'utilisation de la presse hydraulique (Benmammar, 2015)



**La figure 2.12. : Rupture de l'éprouvette au cours de l'essai de compression**

La contrainte est déterminée par la relation :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$\sigma$  : La contrainte

F : La force

S : La surface

Cet essai est destiné à évaluer la résistance à la compression. Il a pour but de :

- ❖ Faire un diagnostic concernant l'ouvrage en béton et voir si ce dernier nécessite une réhabilitation ou la démolition..... (attique, 2021)
- ❖ Evaluer le type de béton (ordinaire, BHP, BTHP, BAP, ...) (ghomari, 2018)
- ❖ *Evaluer* la résistance à la compression pour le dimensionnement de l'ouvrage en béton. (Harride., 2016)

#### **2.4.1.3. Principe de l'essai de compression**

Tout d'abord, il est nécessaire de surfacier les surfaces des éprouvettes afin d'éviter le problème de poinçonnement ou de flexion composée. L'éprouvette est ensuite centré dans la presse hydraulique qui est constituée de deux plateaux l'un inférieur fixe et l'autre supérieur mobile qui doivent être nettoyés avant l'essai. (attique, 2021)

L'essai est réalisé à une vitesse constante avec une précision de 0.5 MPA jusqu'à la rupture ou l'éclatement du béton (Figure 2.12). (Benmammar, 2019)

#### 2.4.1.4. Dimension des éprouvettes utilisées

Lors de la réalisation de cet essai, on utilise soit des éprouvettes normalisé de forme cubique ou cylindrique, qui ont des dimensions différentes et représentées sur le tableau 2.5. Par ailleurs, les éprouvettes carottées sont définies comme des éprouvettes qui n'ont pas une dimension précise (attique, 2021)

**Tableau 2.5. : Les dimensions des éprouvettes**

Le type d'éprouvette	La dimension
Eprouvette cubique	$a \times a \times 4a$ : 7×7×28 / 10×10×40 cm
Eprouvette cylindrique	La hauteur est deux fois diamètre (10 × 20 / 11×22 / 15×30 / 16×32) cm
Carotte	N'a pas de dimension précise

Pour obtenir les éprouvettes carottées, on doit utiliser l'essai de carottage. Cet essai peut être horizontale ou verticale (Hannachi., 2015). L'appareil ferromagnétique peut aussi être utilisé afin d'éviter le ferrailage. (attique, 2021)



**Figure 2.13. : Les méthodes de carottage (Hannachi., 2015)**

#### 2.4.1.5. Inconvénients de l'essai

- ❖ Impossible de détecter des problèmes,
- ❖ Le béton testé peut être différent du béton de la structure (attique, 2021)

## **2.4.2) Essai de traction par fendage**

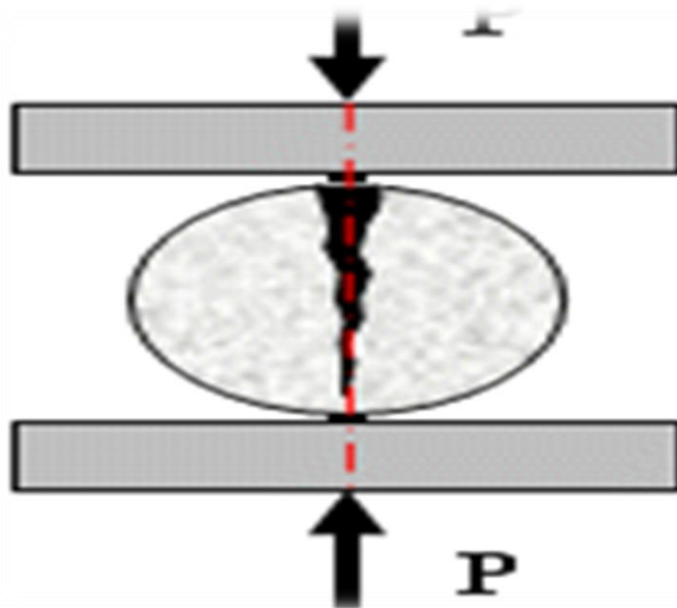
### ***2.4.2.1. Introduction***

L'essai de traction par fendage appelé aussi l'essai brésilien (redjal, sans date) est utilisé pour déterminer la résistance à la traction par fendage (Harride., 2016)

Cet essai peut être effectuer sur des éprouvettes cylindriques ayant des génératrices rectilignes et des dimensions (diamètre, hauteur) différentes (tableau 2.6) (redjal, sans date). Ces éprouvettes au moment de la rupture vont avoir des fissures au milieu (figure 2.14)

**Le tableau 2.6. : Les éprouvettes cylindriques utilisées dans l'essai de traction fendage**  
(redjal, sans date)

FORMA	DIMENSION DE FABRICATION		D <sub>max</sub> mm
	Diamètre a	Hauteur b	
Cylindre de 11	112.8	220	<25
Cylindre de 16	159.6	320	<40
Cylindre de 25	252.5	700	<36



**La figure 2.14. : Essai de traction par fendage**

### ***2.4.2.2. Principe de l'essai de traction par fendage***

Redjal et al ont expliqué qu'en appliquant une force de compression radiale qui suit deux génératrices diamétralement opposé, cette force de compression conduit à un effort de fendage. La détermination de la résistance à la traction par fendage est obtenue en divisant la charge qui provoque la rupture de l'échantillon sur la surface de cylindre. Ce contrôle donne des résistances qui peuvent être améliorées par rapport à la vraie valeur de la résistance

spécifique à la traction directe. Il semble que l'excès de résistance soit de l'ordre de 8 à 10% (gorisse, sans date) (xavier, sans date)

La formule suivante représente la valeur de la résistance à la traction en fonction de la section :

$$\sigma = \frac{2P}{\pi.D.L.}$$

Où

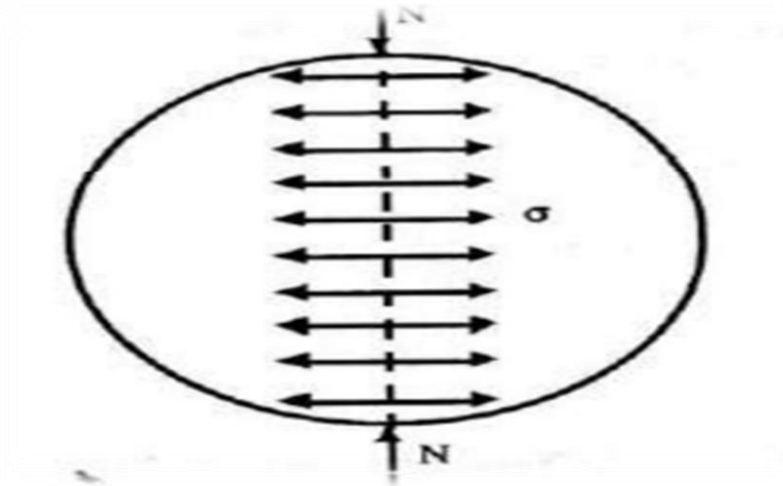
P : la charge de rupture,

D : le diamètre de cylindre,

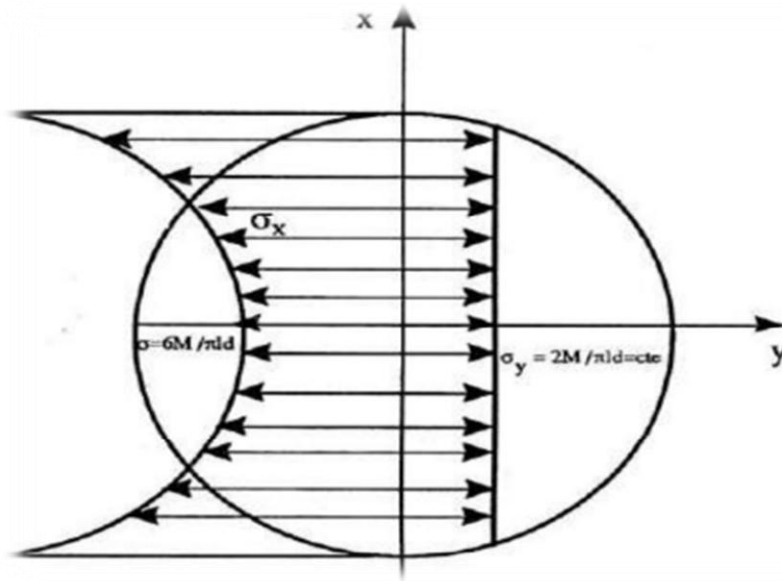
L : la longueur de cylindre

### **2.4.2.3. Description De l'essai**

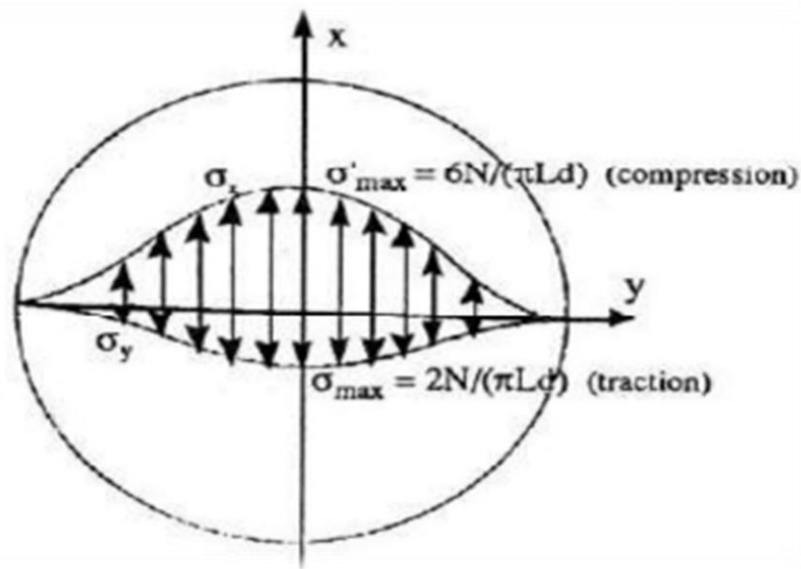
L'essai de traction par fendage nommé aussi l'essai de traction indirecte ou l'essai brésilien se base sur l'application d'une force de compression (xavier, sans date). Cette force par effet de poinçon provoque des contraintes de traction à l'intérieur de plans médiane (figure 2.15). Au moment de rupture, les contraintes de traction vont développer sur le plans de fendage la rupture des éprouvettes (Figure 2.16) au niveau du centre de l'éprouvette, Ce plans est défini comme la hauteur du plans diamétrale verticale. Sur ce plan on a une contrainte de traction constante qui provoque un état de traction pure mais la présence d'une contrainte de compression sur ce même plan conduit à une augmentation trop élevé de la résistance du béton à la traction (Figure 2.17) (redjal, sans date)



**Figure 2.15. : développement des contraintes de traction suivant un plan médiane** (redjal, sans date)



**Figure 2.16. : Répartition des contraintes de traction suivant le plan diamétrale Verticale lors d'essai de traction par fendage (redjal, sans date)**



**Figure 2.17. : Répartition des contraintes de traction suivant les plans diamétraux (Verticale) (redjal, sans date)**

Pour réaliser cet essai on dispose l'échantillon testé dans la presse brésilien (figure 2.18) qui se constitue de deux plateaux supérieur et inferieur qui vont fixer notre éprouvette testé, et dans le but d'assurer le meilleur contacte entre les plateaux de la presse brésilienne et l'échantillon testé, il faut introduire une réglette de contreplaqué de 5 mm (figure 2.19). Le plateau supérieur de la presse brésilien va descendre jusqu'à la rupture de l'éprouvette. (attique, 2021)



Figure 2.18. : la presse brésilienne

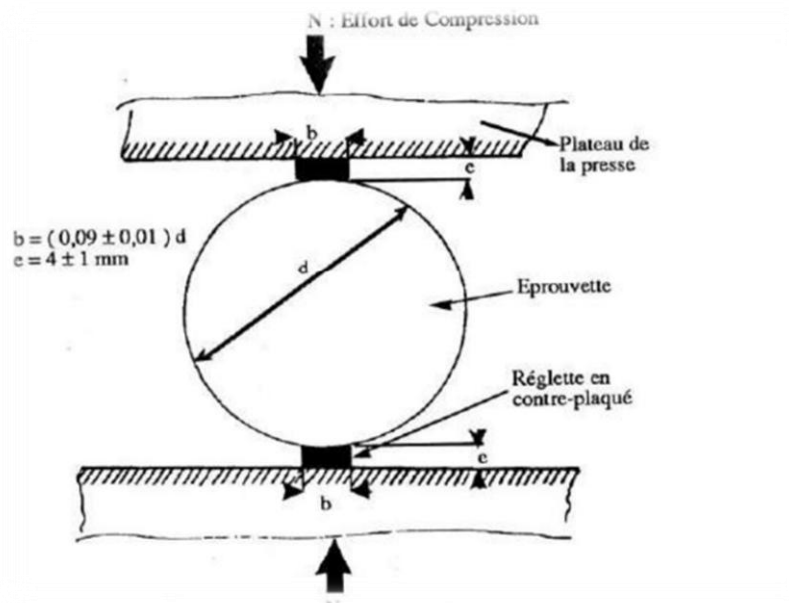


Figure 2.19. : Dispositifs de mise en charge de l'éprouvette cylindrique pour essai de Traction par fendage (redjal, sans date)

### **2.4.3. Essai de traction directe**

L'essai de traction directe a pour but de déterminer la résistance à la traction du matériau (Harride., 2016). Cet essai se base sur l'application d'un effort de traction centré au niveau des extrémités d'une éprouvette dans le but d'éviter les moments de flexion qui parasitent les résultats. L'essai se caractérise par sa difficulté lors de sa réalisation et ne peut donc être utilisé couramment. Il se réalise sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques ayant des dimensions différentes. Après avoir scié les extrémités des éprouvettes d'un ou de deux centimètres, les extrémités des échantillons sont collées aux mors d'attache avec une colle dont la résistance est plus élevée que celle du béton. (redjal, sans date)

La résistance à la traction est donnée par la formule :

$$R_t = N/S$$

Où N et S représentent respectivement l'effort de rupture ainsi que la section d'éprouvette

#### ***2.4.3.1. Conduit d'essai***

Au niveau de l'appareil on procède à la fixation et au centrage d'échantillon testé. Ce centrage doit avoir une erreur qui ne dépasse pas le 1/100 du diamètre (Harride., 2016). Le centrage de l'éprouvette testé est fait dans le but de concentrer la rupture au milieu des éprouvettes (attique, 2021). L'éprouvette testée munie de ses plaques de traction et toujours entourée du film polyéthylène (Harride., 2016)

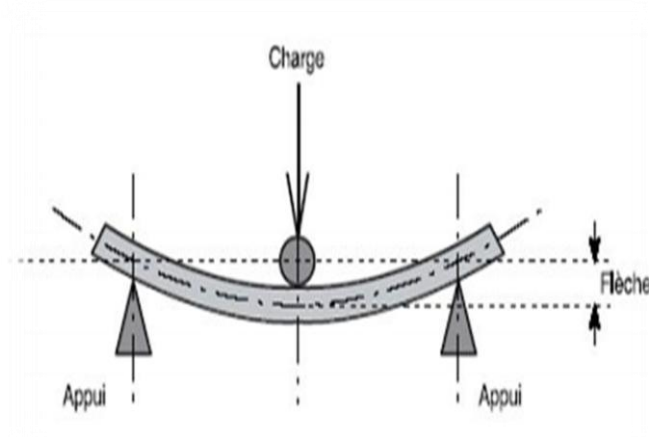
Au cours de l'essai, l'effort de traction doit être appliqué sans créer de chocs et de manière continue : la vitesse de montée en charge ne doit pas être variée durant toute la période de contrôle. (magramons, sans date)



**Figure 2.20. : Essai de traction directe**

### **2.4.4. Essai de traction par flexion**

Cet essai est destiné à l'évaluation de la résistance à la traction par flexion (Harride., 2016) d'un matériau. Il est le plus utilisé par rapport aux autres essais cités ci-dessus. (redjal, sans date)



**Figure 2.21. : Essai de flexion** (Harride., 2016)

#### **2.4.4.1. Principe d'essai**

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la traction par flexion par l'application d'une force croissante jusqu'à la rupture au niveau du centre de l'éprouvette testée. (Harride., 2016)

Cet essai est réalisée sur des éprouvettes prismatiques de dimension  $a \times a \times 4a$ . (redjal, sans date)

La formule qui permet d'obtenir la résistance en fonction de la force appliquée est donnée par a relation suivante :

$$R_{fl} = \frac{3N}{a}$$

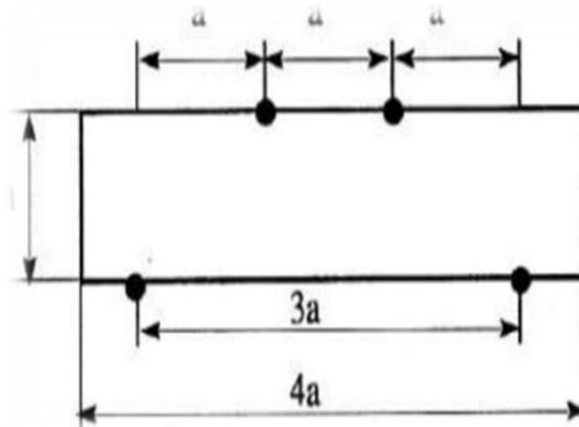
Où

N : est l'effort de rupture

a : le côté de la section carré de l'éprouvette

#### **2.4.4.2. le déroulement d'essai (gorisse, sans date)**

Cet essai se fait soit en utilisant un dispositif de flexion de 4 points appelé la flexion pure (figure 2.22) , soit en utilisant le dispositif de flexion de 3 point



**Figure 2.22. : Dispositif de flexion de 4 points** (redjal, sans date)

On dispose l'éprouvette au appareil de chargement sur des appuis qui sont constitués par des rouleaux en acier de 20 mm de diamètre et on applique une charge de manière continu et sans choc avec une cadence de **0.17 KN/S** pour **un prisme de 10\*10\*40**). (magramons, sans date)

Lors de la durée de l'essai, la partie supérieure de l'éprouvette est soumise à en état de compression alors que la partie inferieure est en état de traction.

### **2.5. Conclusion :**

Ce chapitre a permis de rassembler les essais non destructifs et destructifs les plus utilisés pour la caractérisation du matériau béton.

A partir de la revue bibliographique, il est clair que les essais destructifs restent plus précis et directs pour déterminer les résistances du matériau testé. Concernant les essais non destructifs, même si leurs utilisations restent inévitables pour les matériaux déjà mis en place, les résultats qu'ils offrent restent moins précis car des relations parfois empiriques doivent être utilisées pour évaluer la résistance réelle du matériau.

Dans le chapitre suivant, on présentera un état de l'art sur les travaux scientifiques réalisés sur le matériau béton en utilisant les essais non destructifs et destructifs.

## CHAPITRE 3 : RESULTATS ET INTERPRETATION

### 3.1.Introduction

Plusieurs auteurs se sont intéressés à l'étude des corrélations qui puissent exister entre les différents essais destructifs et non destructifs et développer des modèles prédictives. Ce chapitre regroupe les résultats de quelques-unes de ces études.

### 3.2. Corrélation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique

Plusieurs auteurs ont étudié la corrélation entre la vitesse d'impulsion d'ultrason et le module d'élasticité dynamique.

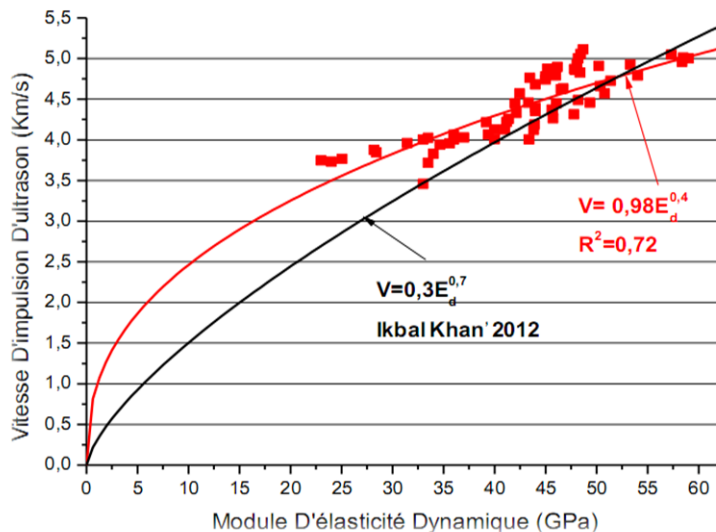
Iqbal khan (2012) a déterminé une relation intéressante : (Harride., 2016)

$$V = 0,3 E_d^{0,7} \dots\dots\dots(3.1)$$

Les travaux de Benmammar et al (2019) ont utilisé les additions minérales dans la formulation des bétons. Ces auteurs ont développé une nouvelle relation corrélation pour les bétons avec additions avec un coefficient de détermination assez intéressant de l'ordre de 0,72. Leur relation est exprimée comme suit :

$$V = 0,98 E_d^{0,4} \dots\dots\dots(3.2)$$

La figure (3.1) présente l'évolution de la vitesse ultrasonores en fonction de module d'elasticite dynamique .



La Figure 3.1. : Evolution du module d'elasticité dynamique en fonction en fonction de la vitesse des onde acoustique (Benmammar, 2019)

### 3.3.la relation entre la vitesse d'onde ultrasonore et la résistance a la compression

La resistance à la compression peut aussi être exprimée à partir de la vitesse d'une onde ultrasonore a travers une relation corrélatrice. (Iqbal khan.,2012) a exprimé cette relation de la manière suivante :

(Benmammam, 2019) cette relation peut s'exprimer de la manière suivante :

$$V = 1,55 F_{cu}^{0,278} \dots\dots\dots(3.3)$$

La figure (3.2) représente la vitesse de propagation d'onde ultrasonore mesurée en fonction de la résistance à l'écrasement  $F_{cu}$  des équations ci-dessus. A partir de cette figure, si on compare les valeurs de la vitesse de propagation des ondes acoustiques obtenue par les deux équations, on remarque que la première équation réduit un peu la vitesse d'impulsion d'ultrason par rapport à la seconde équation, en particulier pour les résistances en compression supérieures à 17 MPA, avec un coefficient d'erreur de 6,75% pour entre les deux relations. (Benmammam, 2019)

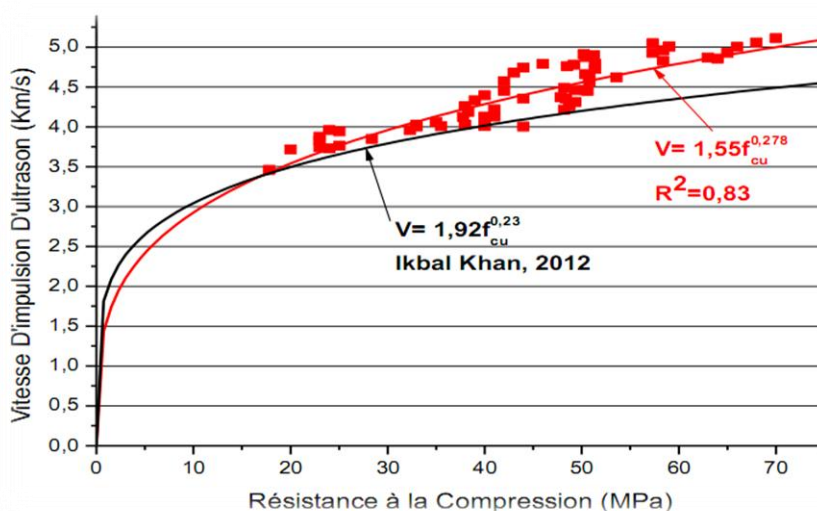


Figure 3.2. : Relation entre la résistance à la compression et la vitesse des ondes ultrasonores (Benmammam, 2019)

Les travaux de Boukhalkahl et al. montre aussi cette corrélation. La figure 3.3 montre la courbe qui représente la relation de corrélation s'exprime par l'équation (3.4) de forme exponentielle avec un coefficient de corrélation égale à 0.926 . (Harride., 2016)

$$R = 0,342 \exp (1,004 V) \dots\dots\dots(3.4)$$

Avec R en MPA et V en Km/s

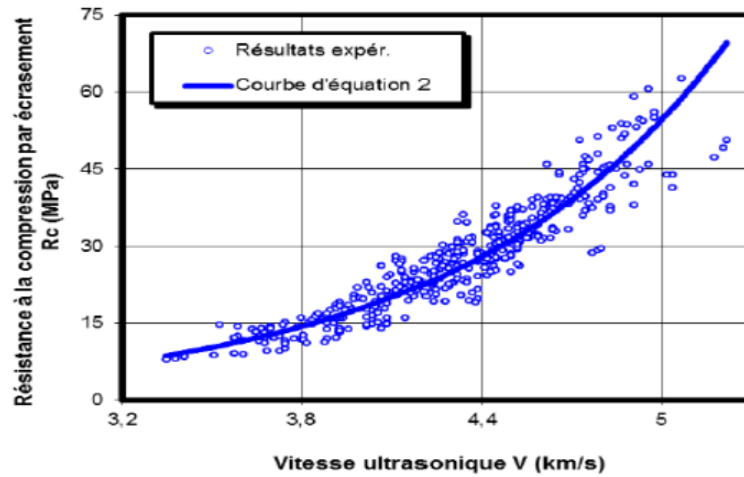


Figure 3.3. : Corrélation entre la résistance à la compression et la vitesse ultrasonique (Harride., 2016)

Cette allure de la courbe est aussi retrouvée par plusieurs chercheurs :

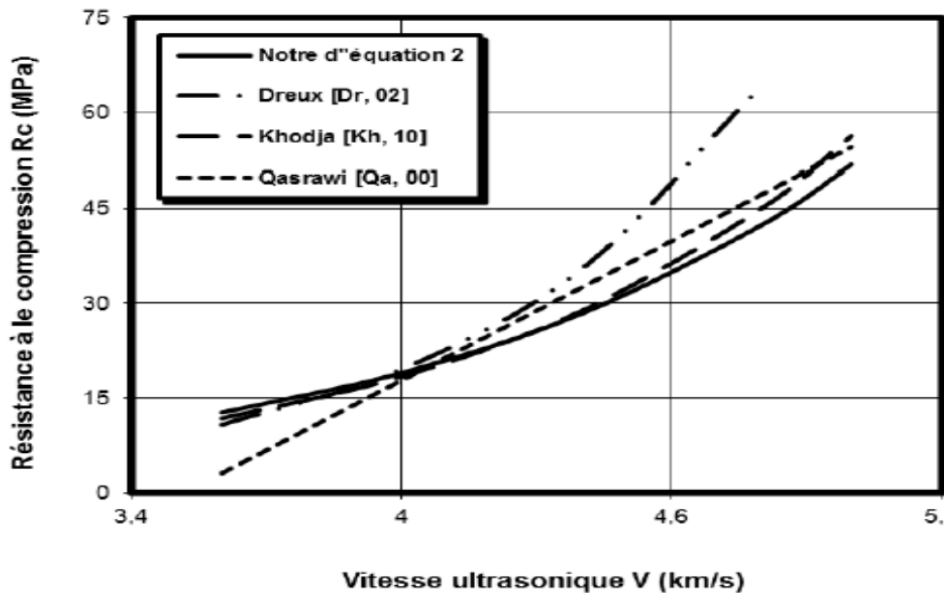


Figure 3.4. : Corrélation entre la résistance à la compression et l’UPV développée par divers chercheurs (Harride., 2016)

**Idrissou et al** a développé deux modèles très intéressants qui relie la résistance à la compression « R » avec la vitesse des propagations des ondes acoustique « V » respectivement pour des éprouvettes maturées à l’eau et d’autres éprouvettes maturées à l’air: (Harride., 2016)

$$R = 0,525 \exp (0,880 V) \dots\dots\dots(3.5)$$

$$R = 0,899 \exp (0,844 V) \dots\dots\dots(3.6)$$

Ces auteurs ont constaté que le deuxième modèle de l’éprouvette stockée à l’air libre est plus proche de la réalité et s’adapte correctement aux carottes extraites des poteaux des ouvrages (Figure 3.5). (Harride., 2016)

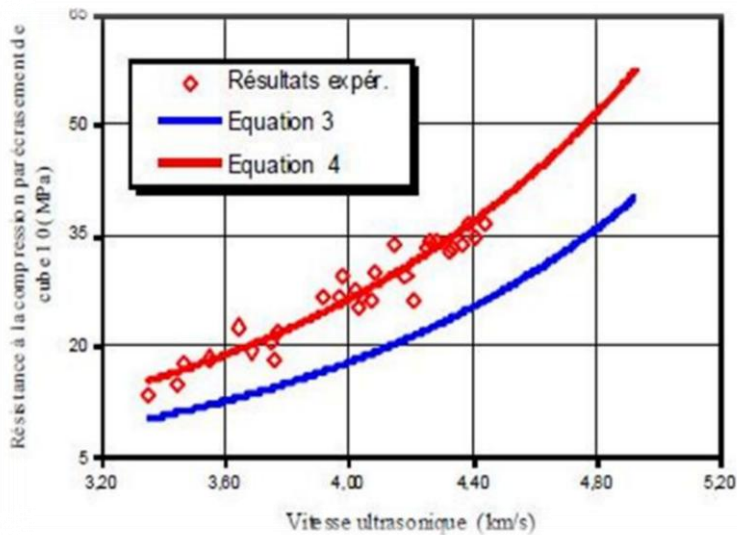


Figure 3.5. : Comparaison entre les modèles et les résultats expérimentaux (Harride., 2016)

### 3.4. Corrélation entre l'essai de scléromètre et essai de compression (Harride., 2016)

En basant sur des résultats de Khodja Ali ben Yahia et al. une relation a été développée et qui relie la résistance à la compression « R » avec indice sclérométrique « I » correspondants, cette corrélation combine les différents bétons qui sont prélevé sur des sites qui sont différents et soumis à des contrôle à différents moments

Cette relation est une fonction de forme puissance s'exprime par l'équation (3.7) avec un coefficient de corrélation R de 0.928 et un écart type égal à 3.170 MPA. Cette corrélation est représentée par la formule suivante :

$$R = 0,121 I^{1,583} \dots\dots\dots(3.7)$$

Selon **khodja ali benyahia et al** ; une autre relation a été développée avec un coefficient de corrélation R = 0.959 et un écart type de 1.876. Cette relation s'exprime de la manière suivante :

$$R = 0,049 I^{1,802} \dots\dots\dots(3.8)$$

A partir de la figure 3.6, il est clair aussi que les deux relations sont corrélables.

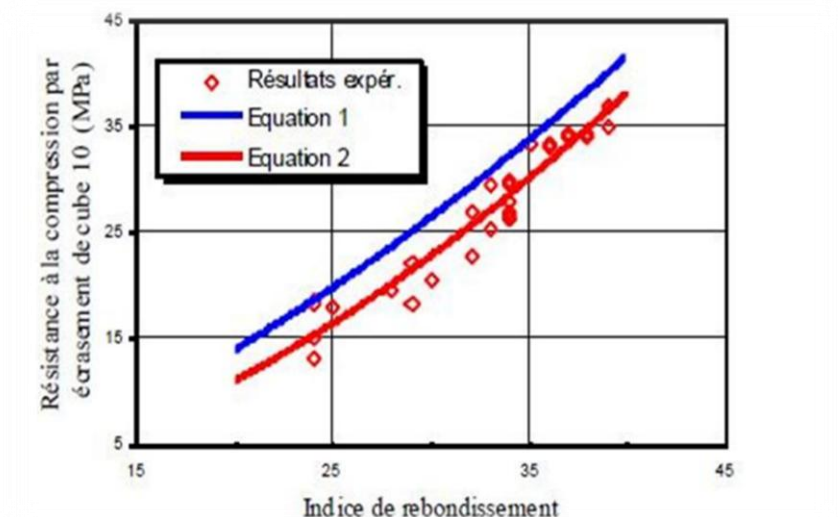


Figure 3.6. : Relation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement au scléromètre (Harride., 2016)

Les travaux de Boukhelkhal et al. ont aussi mis en évidence la relation entre la résistance et l'indice de rebondissement. La figure (3.7) représente cette relation qui s'exprime par l'équation (3.9) et qui est de forme puissance avec un coefficient de corrélation égale à 0.957.

$$R = 0,013 I^{2,112} \dots\dots\dots(3.9)$$

Avec R en MPA

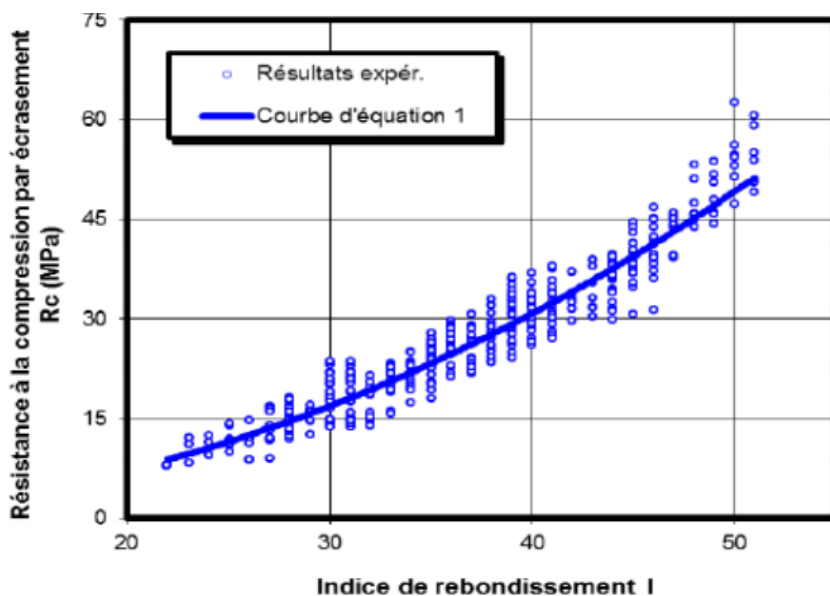


Figure 3.7 : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissements (Harride., 2016)

La même allure de cette courbe est retrouvée dans plusieurs études similaires comme le montre la figure 3.8

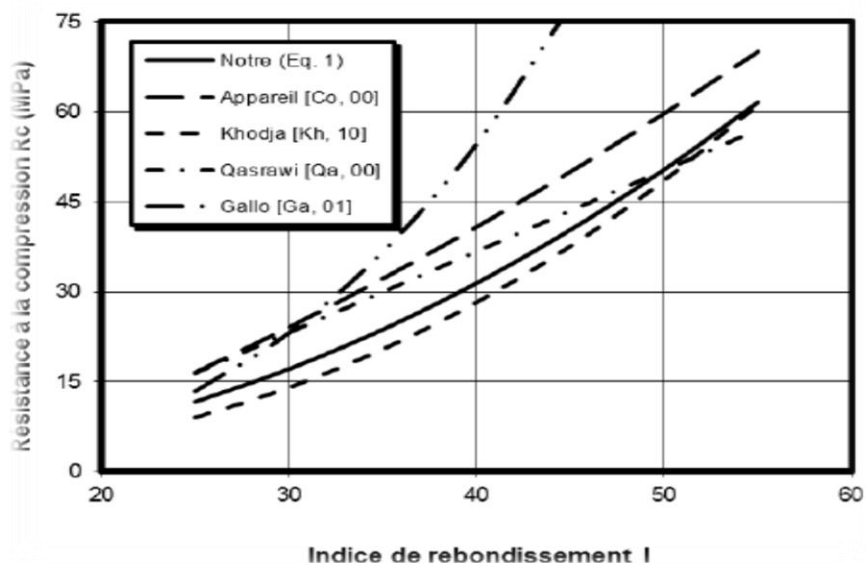


Figure 3.8. : Corrélation entre la résistance à la compression et l'indice de rebondissement établies par divers chercheurs (Harride., 2016)

### **3.5.application de la méthode combinée pour l'estimation de la résistance a la compression (Harride., 2016)**

Dans le but d'obtenir une meilleure appréciation de la résistance à la compression en utilisant des contrôles indirects, il convient de procéder au calibrage des valeurs de mesure qui sont issues de deux essais (essai de l'homogénéité et la dureté de surface superficiel du béton). Il est nécessaire dans ce cas d'utiliser l'analyse statique afin d'interpréter les données observées dont la régression linéaire multiple.

Dans ce sens, une autre relation a été développée par la méthode combinée pour relier les résultats de deux essais non destructifs : le scléromètre et l'ultrason avec ceux de la résistance mécanique pour des échantillons en béton qui stockés dans l'eau. Cette relation s'exprime comme suit

$$R = 9,576 V + 0,800 I - 37,436 \dots \dots \dots (3.10)$$

Cette méthode combinée a pour but d'apporter une meilleure appréciation de la résistance au cœur du béton. Toutefois la résistance potentielle su site peut être relier à la résistance caractéristique par la relation suivante :

$$R \text{ (poentielle)} = R(\text{estimé}) \text{ } 3,5 \text{ MPA} \dots \dots (3.11)$$

Hannachi et al. ont développé plusieurs relations et les ont traduit sous forme de courbes de régression. Les principales relations sont regroupées dans les tableaux (3.1) (a et b) et présentées sur les figures (3.9)et(3.10).

Tableau 3.1. : Corrélation entre la résistance ,UPV et indice sclérométrique (Hannachi., 2015)

Equations de corrélations et coefficient de détermination des régressions-résistance compression  
**échantillons**

Indice scléromètre N Site1	$F_c = -0.7708N + 54.6389$	$R^2 = 0.3983$
Vitesse ultrasonique V Site1	$F_c = -0.0162V + 97.54095$	$R^2 = 0.5213$
Méthode combinée Site1	$F_c = 0.5752V - 0.0261N + 121.2976$	$R^2 = 0.5452$
Indice scléromètre N Site2	$F_c = 0,3289N + 15,28$	$R^2 = 0,1702$
Vitesse ultrasonique V Site2	$F_c = 0,0146V - 7,8111$	$R^2 = 0,5119$
Méthode combinée Site2	$F_c = 15,11V + 9,49e - 5N + 0,322$	$R^2 = 0,1715$

Equations de corrélations et coefficient de détermination des régressions-résistance compression  
**carottes**

Indice scléromètre N Site1	$F_c = 0.3218N + 5.3290$	$R^2 = 0.0864$
Vitesse ultrasonique V Site1	$F_c = 0.0088V - 20.2771$	$R^2 = 0.0901$
Méthode combinée Site1	$F_c = 0.0993V + 14.5356N - 0.0037NV - 371.4$	$R^2 = 0.1251$
Indice scléromètre N Site2	$F_c = 0,8782N - 7,8111$	$R^2 = 0,5592$
Vitesse ultrasonique V Site2	$F_c = 0,0176V - 57,518$	$R^2 = 0,4942$
Méthode combinée Site2	$F_c = 15,11V + 9,49e - 5N + 0,322$	$R^2 = 0,5592$

Hannachi et al.2015 a remarqué que les relations de corrélations obtenue à partir de la méthode combinée qui se base par la combinaison des contrôle indirecte et les contrôle directe (scléromètre et ultrason et essai de compression traditionnelle) est la plus fiable pour la prédiction de la résistance à la compression.

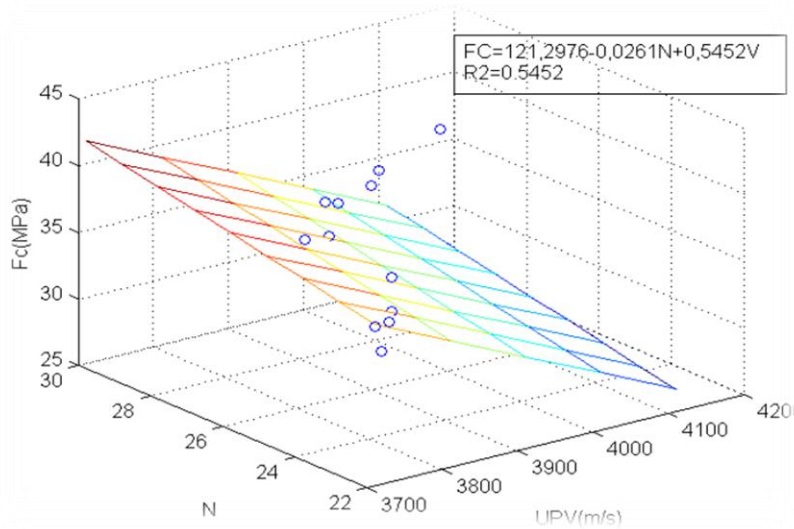


Figure 3.9. : Corrélation entre la résistance, l'UPV et l'indice sclérométrique (Hannachi., 2015)

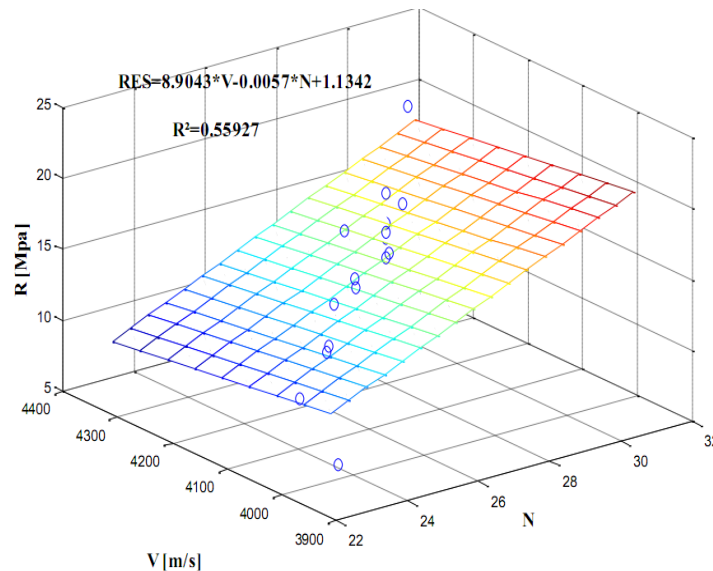


Figure 3.10. : Corrélation entre la résistance, l'UPV et l'indice sclérométrique (Hannachi., 2015)

La figure 3.11 représente une courbe iso-réponse de la résistance à partir des résultats des contrôles indirectes (scléromètre et ultrason). Cette courbe a été développée sur de régression multiple avec une fonction en puissance présenté par l'équation (3.12) : (Harride., 2016)

$$R = 0,013 \times V^{1,756} \times I^{1,401} \dots\dots\dots(3.12)$$

Avec R en MPA et V en KM/S

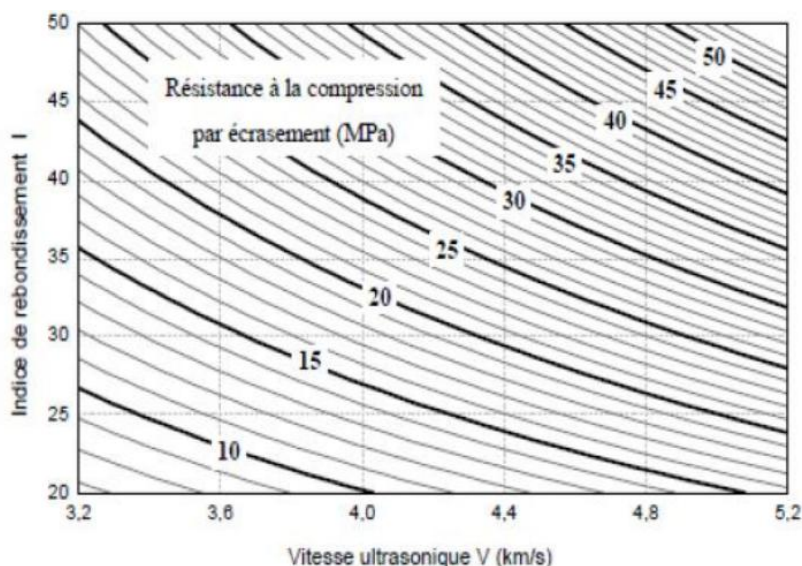


Figure 3.11. : Courbe iso-réponse Résistance - indice de rebondissement – UPV (Harride., 2016)

Mehamdia et al. Ont comparé plusieurs résistances déterminées par des essais destructifs et non destructifs comme le montre les tableaux 3.2 et 3.3 sur des éprouvettes de forme cubique et cylindrique et ceci à différents âges du béton (7j, 14j et 28j) (Harride., 2016)

#### Eprouvettes Cylindriques

Tableau 3.2. : les résultats de la résistance obtenue par des essais mécaniques pour les différents âges pour une éprouvette cylindrique (Harride., 2016)

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

#### Eprouvettes Cubiques

Tableau 3.3. : les résultats de la résistance obtenue par des essais mécaniques pour les différents âges pour une éprouvette cubique (Harride., 2016)

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

Les résultats obtenus montrent que les résistances obtenues à partir des essais directs sont toujours moins élevées par rapport aux résistances déterminés par des contrôles indirectes.

Les résistances obtenues par l'UPV restent presque toujours plus élevées par rapport aux résultats des autres essais.

De plus les résistances obtenues sur les éprouvettes cylindriques restent plus élevées par rapport à celle des éprouvettes cubiques, ce qui est conforme à la norme 206-1.

Toutefois, ce constat n'a pas été confirmé par les travaux de Benoui et al. qui ont remarqué que les résistances de plusieurs bétons ordinaires obtenues par l'essai de compression simple restent plus élevées à 7 jours et 14 jours par rapport à celles obtenues par le scléromètre, comme l'indique les figures 3.12 et 3.13. Par contre ces auteurs confirment que les résistances à 28 jours deviennent plus grandes quand on utilise le scléromètre comme le montre la figure 3.14 (Harride., 2016)

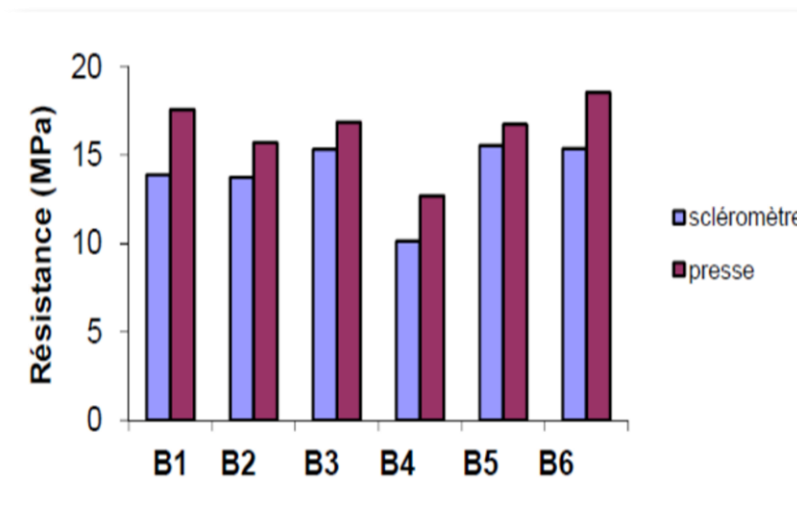


Figure 3.12 : résistance du béton a 7 jours (Harride., 2016)

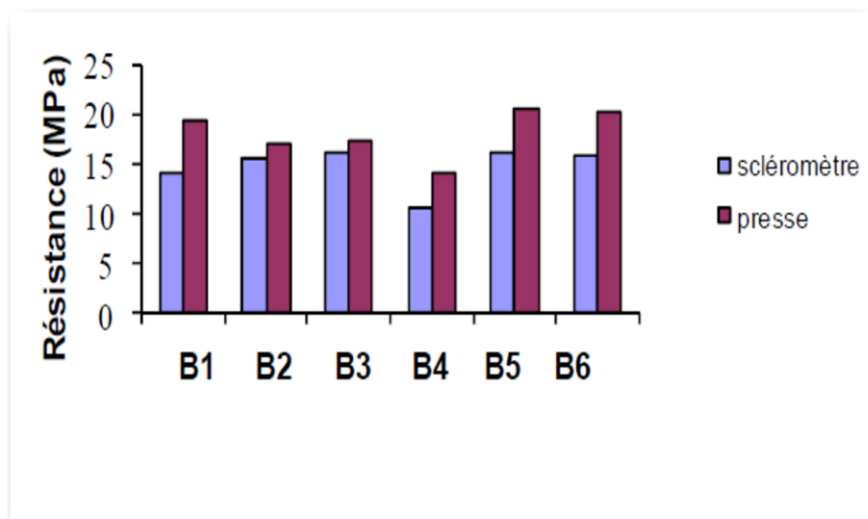


Figure 3.13 : résistance du béton à 14 jours (Harride., 2016)

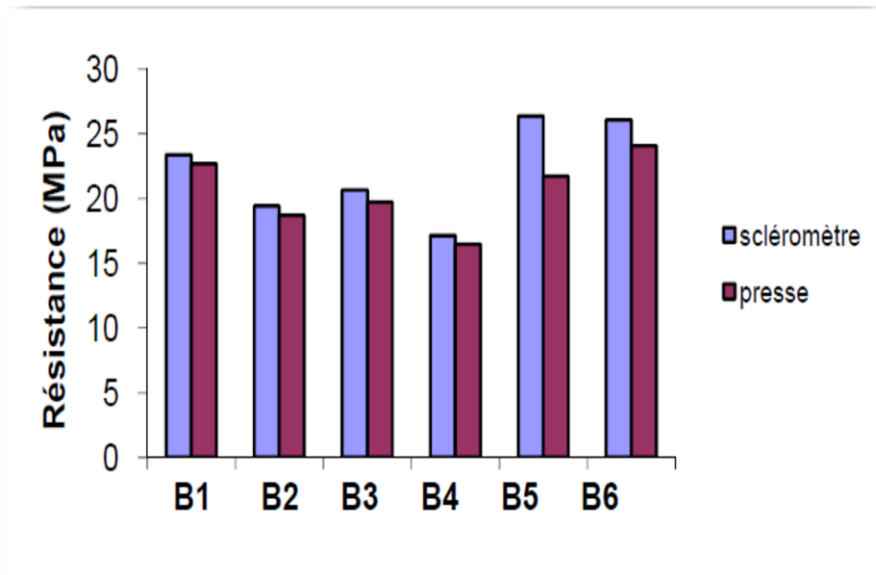


figure 3.14 : résistance du béton à 28 jours (Harride., 2016)

### **3.6. Conclusion**

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent clairement que les différents essais utilisés pour caractériser la résistance du béton ne donnent pas forcément les mêmes résultats même si ces derniers sont corrélés. Il faudra donc être prudent dans l'interprétation des résultats obtenus.

## **CONCLUSION GENERALE**

Dans ce travail à caractère bibliographique, des recherches approfondies sur le matériau béton et sur les méthodes d'essais pour le caractériser ont été réalisées.

La recherche bibliographique a clairement montré l'influence du ciment et des granulats sur la résistance mécanique. L'eau reste aussi un facteur dominant sur les résistances à la compression du béton. Une teneur élevée en dosage en eau est néfaste pour la résistance du béton, alors qu'un dosage insuffisant en eau peut mettre en péril la mise en place du béton dans le coffrage.

Le mode de caractérisation du béton a aussi une incidence sur le résultat obtenu. Les contrôles indirects (les essais ultrasonores et l'essai de la dureté de surface) peuvent contribuer à l'estimation de la résistance à la compression in situ. Toutefois, il faudra faire attention à l'intervalle de variation et des incertitudes des valeurs mesurées par l'UPV ou par le scléromètre, ainsi que l'amplitude de l'erreur de mesure et de la précision de l'ajustement du modèle utilisé.

Ces contrôles indirects peuvent être inévitables dans certains cas quand les prélèvements sont impossibles pour des raisons d'accessibilité ou de sensibilité de l'ouvrage. Dans ce cas, il serait préférable d'assurer un bon suivi de contrôle et d'utiliser les relations de corrélations pour estimer les résistances mécaniques.

Quoi qu'il en soit, les essais non destructifs ne peuvent pas remplacer les essais directs qui sont plus fiables. Toutefois, si ce sont les essais destructifs qui sont réalisés, les méthodes non destructives peuvent être réalisées comme des techniques additionnelles

## Étude bibliographique

- **A .KORTEBEY ., (sans date) :** « essai non destructifs » travaux pratique , université Médéa
- **ALEXANDER K.M., IVANUSEC I. (1982);** Long term effects of cement SO<sub>3</sub> content on the properties of normal and high-strength concrete, Part I. The effect on strength, Cement and Concrete Research, 12, N° 1.
- **BOUKLI HACENE S. M. A., (2010) :** « Contribution à l'étude de la résistance caractéristique des bétons de la région de TLEMCCEN » Thèse de Doctorat à l'Université de Tlemcen.
- **BARON J., OLLIVIER J.P. (1996) ;** Les bétons bases et données pour leur formulation,
- **Benmammar et al., (2019) :** « utilisation des méthodes non destructifs pour la détermination des propriétés du béton » thèse de doctorat université Tlemcen
- **BARON J., OLLIVIER J.P. (1996) ;** Les bétons bases et données pour leur formulation, Edition Eyrolles, Paris
- **Bungey et al. (2001);** Bungey JH, Soutsos MN. « Reliability of partially destructive test to assess the strength of concrete on site ». Construction & building materials, volume 15, issues 2-3, pages 81-92, mars-avril 2001.
- **Bouakkeze .m (2011-2012) :** « caractérisation du béton par les méthodes non destructifs – application de la méthode de fréquence de résonance » thèse de magistère université de Tlemcen
- **El-BACHIR Yasmina., (2014) :** « Effet des différents adjuvants sur la performance du béton » Master professionnel à l'Université de d'Oran « Mohamed boudiaf ».
- **GOUFI Nouredine, KAID Nouria, ABIDELAH Anis,AYED Kada, KERDAL Djamel., (2011) :**« EFFET DE LA POZZOLANE DE BENI SAF SUR LA DURABILITE DES BETONS » séminaire sur les technologies du béton, USTMB Oran.
- **GABRYSIA. F :** Matériaux, Chapitre 4 bétons, 2007.
- **Hannachi. S ., (2015) :** « évaluation de la résistance à la compression du béton sur site : application de la méthode combinée » mémoire de doctorat ,université Constantine
- **Harride. H, Sraidi. S., (2016) :** « contrôle de la qualité du béton par des essais non destructifs », université de Guelma
- **M Mouli, H.Khelafi., (2008) :** « Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan » Building and Environment , vol 43, pp 31–36.
- **N Belas Belarbi, M Semcha, L Laoufi., (2003) :** « Influence de la pouzzolane de Beni-saf sur les caractéristiques mécaniques des bétons » Canadian Journal of Civil Engineering 30 no3 580-584.
- **NEVILLE A.M. (2000) ;** Propriétés des bétons, ed. CRIB., Paris, Eyrolles.
- **OLLIVIER J.P., BUIL M. (1992) ;** Conception des bétons : la structure poreuse, « La durabilité des bétons », Presses de l'école Nationale des Ponts et Chaussées, Eds., Paris.

## ▪ Les sites web

- web bachir redjel et mourade yahiaoui « la mesure de la résistance du à la traction » , <http://www.entp.edu.dz/revue/files/article/04/article%206.pdf> (consulté le 3/4/2021)
- web « chapitre 3-essai non destructifs du béton » , <http://thesis.univ-biskra.dz/1328/5/partieI%20chapitre%2003.pdf> (consulté le 2/4/2021)
- web « évaluation de la résistance du béton in situ » , [https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/pdfs/FicheD1-7-Guide\\_Auscultation\\_Ouvrage\\_Art-Cahier\\_Interactif\\_Ifsttar.pdf](https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/pdfs/FicheD1-7-Guide_Auscultation_Ouvrage_Art-Cahier_Interactif_Ifsttar.pdf) (consulté le 1/4/2021)
- web xavier -jourdain hélène horsin molinaro-françois soleilhet « essai destructifs sur éprouvette en béton et acier d'armature » , <https://eduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/10342/10342-essais-destructifs-sur-eprouvettes-en-beton-et-acier-darmature-ensps.pdf> (consulté le 4/5/2021)
- web « sclérometre » , <https://fr.wikipedia.org/wiki/Scl%C3%A9rom%C3%A8tre> (consulté le 1/5/2021)
- web« mesure au sclérometre » , [https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/pdfs/FicheB1-1-Guide\\_Auscultation\\_Ouvrage\\_Art-Cahier\\_Interactif\\_Ifsttar.pdf](https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/pdfs/FicheB1-1-Guide_Auscultation_Ouvrage_Art-Cahier_Interactif_Ifsttar.pdf) (consulté le 1/5/2021)
- web « contrôle par ultrason » , [https://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le\\_par\\_ultrasons](https://fr.wikipedia.org/wiki/Contr%C3%B4le_par_ultrasons) (consulté le 4/5/2021)
- web «auscultation sonique du béton (auscultation par ultrason) » , [https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/pdfs/FicheB1-2-Guide\\_Auscultation\\_Ouvrage\\_Art-Cahier\\_Interactif\\_Ifsttar.pdf](https://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/pdfs/FicheB1-2-Guide_Auscultation_Ouvrage_Art-Cahier_Interactif_Ifsttar.pdf) (consulté le 7/5/2021)
- web « essai au sclérometre » , <http://www.esiris-group.com> (consulté le 8/5/2021)