

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Mémoire de Master

Présenté à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : STRUCTURES

Présenté par :

THABTI Maha

Thème :

Mesure des caractéristiques des mortiers et bétons par les Ultrasons

Sous la direction de :

Pr. BENMALEK Mohamed Larbi

Juillet 2021

REMERCIEMENTS

Je veux commencer par "merci mon Dieu" pour m'avoir donné la patience et la capacité de finir ce travail.

Ensuite; Je tiens à manifester ma reconnaissance à mon encadreur " PR. BENMALEK MOHAMED LARBI " et je vous dire : «merci monsieur c'est vos conseils qui m'ont aidé et qui m'ont éclairé le chemin de mon travail, merci aussi pour la confiance que vous m'avez accordé».

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

Merci ma chère mère et mon cher pèrevous êtes toujours là pour m'encourager.

DEDICACES

À ma chère mère qui est toujours là pour moi qui est la source de force pour affronter les différents obstacles, merci maman c'est toi qui me guide.

À ma force; mon soutien dans la vie; mon cher papa "Yazid" qui aurait bien voulu voir cet instant. Mon papa merci d'être toujours à mes côtés tant sur le plan moral que financier.

À mes chers frères : AHMED et MOHAMED.

À mes chères sœurs : Hala; Nouha; Lina et Abir.

À mon encadreur Pr. Benmalek.

À ma petite "Michou".

Résumé

Dans le cadre des contrôles d'ouvrages neufs ou en construction, comme les diagnostics d'état d'ouvrages anciens, il est important de vérifier la résistance des matériaux. Et c'est le but des essais non destructifs.

Ces essais sont très pratiques, rapides et avec un coût raisonnable et faciles à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage.

Dans cette étude bibliographique nous avons essayé de comprendre les essais destructifs et les essais non destructifs et en nous concentrant sur l'essai ultrasonique.

Mots clés : béton, mortier, essais destructifs et non destructifs, essai ultrasonique.

Abstract

As part of inspections of new or under construction works, as well as diagnostics of the condition of old works, it is important to check the resistance of the materials. For this, the non-destructive tests aim to qualify, without destruction and respecting its integrity. These tests are very practical, fast and with a reasonable cost and light to implement, and moreover provide a global response at the scale of a structure or a work.

In this literature review we have tried to understand destructive testing and non-destructive testing and much more ultrasonic testing.

Keywords: concrete, mortar, destructive and non-destructive testing, ultrasound testing.

ملخص

في عمليات التشخيص في الأعمال الجديدة أو قيد الإنشاء، وكذلك تشخيص حالة الأعمال القديمة، من المهم التحقق من مقاومة هذه المواد و هذا ما تهدف اليه الاختبارات غير المدمرة.

هذه الاختبار اتعملية للغاية وسريع وغير مكلف وخفيفة في التنفيذ، علاوة على أنها توفر استجابة عالمية على نطاق هيكلي وعملي.

في هذه الدراسة حاولنا فهم الاختبار المدمر والاختبار غير المدمر والمزيد من الاختبارات.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الملاط، اختبار المدمر وغير المدمر، اختبار الموجات فوق الصوتية

SOMMAIRE

Remerciements	1
Dédicace	2
Résumé	3
Sommaire	4
Liste des figures	10
Liste des tableaux	13
Introduction générale	14
Chapitre 1:Notions générale sur les bétons et les mortiers	16
Introduction	17
1. Le béton	17
1.1. Définition du béton	17
1.2. Les différents types de béton	17
1.3. Formulation	18
1.4. Les constituants d'un béton	18
1. Le ciment	18
2. Les granulats	19
3. L'eau de gâchage	20
4. Les adjuvants	20
1.5. Les propriétés mécaniques	21
1.5.1. La résistance à la compression	21
Déformations instantanées (E_{ij})	21
Déformationsdifférées (E_{vj})	21

1.5.2. La résistance à la traction	22
1.5.3. Porosité	22
1.6. Les caractéristiques du béton	23
1.6.1. Béton frais	23
1.6.2. Béton durci	25
2. Le mortier	27
2.1. Introduction	27
2.2. Les composants	27
Les liants	27
Les sables	28
Les adjuvants	28
Les ajouts	28
2.3. Les type des mortiers	28
2.4. Les caractéristiques du mortier	30
Ouvrabilité	30
a) La table à secousses	30
b) Le maniabilimètre	31
c) Le cône	31
Le temps de prise	31
Résistances mécaniques	32
Retraits et gonflements	33
Conclusion	34
Chapitre 2:Les essais destructifs	35
Introduction	36
1. La résistance à la traction	36
1.1. Détermination expérimentale	37

1.1.1. Essai de fendage	37
1. Définition	37
2. Historique	37
3. Description de l'essai	37
4. Principe de l'essai	37
5. Machine d'essai	38
1.1.2. Essai de traction par flexion	39
1. Principe de l'essai	39
2. Machine d'essai	39
3. Flexion de trois points	39
4. Flexion de quatre points	41
1.1.3. Essai de traction direct	41
1. Principe de l'essai	42
2. Les inconvénients de l'essai direct	42
3. Machine d'essai	42
2. La résistance à la compression	42
2.1 L'essai de compression	43
1. Machine d'essai	43
2. Conduite de l'essai	43
• Mise en place dans la presse	43
• Mise en charge – vitesse de chargement	44
Conclusion	44
Chapitre 3 : Les essais non destructifs	45
Introduction	46
1. Définition	46
2. Avantages de ces méthodes	46

3. Méthodes d'essais	46
3.1. Essai au scléromètre (Rebound Hammer-RH)	47
3.1.1. Définition	47
3.1.2. Objectif	47
3.1.3. Principe de l'essai	47
3.1.4. Appareillage	48
3.1.5. Mode Opérateur	50
Préparation de la surface	50
Points de mesures	50
Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement	51
3.1.6. Les avantages de la méthode scléromètre	52
3.1.7. Les inconvénients de la méthode scléromètre	52
3.2. Essai d'auscultation dynamique (ultrason)	53
3.2.1. Définition	53
3.2.2. Principe	54
3.2.3. Expression de la vitesse	54
3.2.4. Classification du béton d'après la vitesse du son	54
3.3. Essai par radiographie	54
3.3.1. Définition	54
3.3.2. Principes fondamentaux	55
3.4. Méthode par carottage	56
3.4.1. Les types de méthode par carottage	56
3.4.1.1. Carottage vertical	56
3.4.1.2. Carottage horizontal	56
3.5. Les méthodes thermiques	57

3.6. La Maturométrie	58
3.6.1. Méthode d'essai	58
Chapitre 4: Contrôle du béton et de mortier par l'ultrason	60
Introduction	61
1. Définition	61
2. Historique	61
3. descriptif de l'appareil	62
4. Principe	62
5. mode opératoire	64
5.1. Travaux préparatoires	64
5.2. Points de mesures	65
6. Manière de mesure	65
6.1. Mesure en transparence (directe)	65
6.2. Mesures en surface (indirecte)	65
6.3. Mesures semi directe	66
7. Limites d'utilisation	66
8. Avantages	67
9. Inconvénients	67
10. Facteurs affectants la vitesse de propagation	67
Dimension et type des granulats, granulométrie, teneur en granulats	67
Type de ciment	67
Le rapport eau/ciment	68
Les adjuvants	68
L'âge du béton	68
Positionnement du transducteur	68

Température du béton	68
L'humidité et condition de cure du béton	68
Distance entre les transducteurs	69
Niveau de contrainte	69
Présence de barres de renfort	69
11. Relation entre la résistance par écrasement et par mesure ultrasonique	69
CHAPITRE 5:Exemple réels d'utilisation de la méthode ultrasonique	71
1. Exemple expérimentale à l'université 08 mai 1945 de Guelma	72
1.1. Caractéristiques des matériaux	72
1.2. Méthodologie expérimentale	72
1.3. Mesure de la vitesse ultrasonore de l'onde de surface et détection des signaux par l'oscilloscope	74
1.3.1. Éprouvettes témoins	74
2. L'utilisation de la Technique Ultrasonique dans le cas de Béton Recyclé	77
2.1. Les résultats d'essai non destructif	77
3. Essais sont réalisés au niveau du laboratoire des travaux publics du sud LTPS	78
B.LES MORTIERS	81
Exemple 1:Exemple expérimentale à l'université de Tizi Ouzou sur un mortier à l'âge de 28 jours.	81
1. Les constituants du mortier utilisé	81
2. Formulation des mortiers	82
3. Vérification de la résistance par l'essai ultrasonique	84
4. Résultats des essais d'auscultation sonore (ultra-son)	85
CONCLUSION GENERALE	87
REFERENCES BIBLIGRAPHIQUES	88

LISTE DES FIGURES

Chapitre 1	
Figure 1.1 : Dimensionnement du cône métallique d'Abrams.	24
Figure 1.2 : Mesure de l'affaissement au cône d'Abrams.	24
Figure 1.3 : Essais de compression de béton.	25
Figure 1.4 : Table de secousse.	31
Figure 1.5 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre.	31
Figure 1.6 : Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge.	32
Figure 1.7 : Appareillage pour la mesure du retrait.	33
Chapitre 2	
Figure 2.1 : Les essais de traction.	36
Figure 2.2 : Essai de fendage.	38
Figure 2.3 : Portiques pour essais de flexion.	39
Figure 2.4 : Béton soumis à la flexion 3 points.	40
Figure 2.5 : Mortier soumis à la flexion 3 points	40
Figure 2.6 : Essai de flexion de quatre points.	41
Figure 2.7 : Mortier soumis à la compression pure.	44
Chapitre 3	
Figure 3.1 : essai au scléromètre.	47
Figure 3.2 : Coupe longitudinale à travers le Scléromètre.	49

Figure 3.3 : Grille de mesure sur ouvrage.	50
Figure 3.4 : courbe de conversion pour une résistance à la compression moyenne mesurée sur des éprouvettes cylindriques (150×300).	51
Figure 3.5 : Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter.	52
Figure 3.6 : Essai ultrasonique sur une poutre.	53
Figure 3.7 : Principe de la radiographie.	55
Figure 3.8 : Essais de carottage verticale.	56
Figure 3.9 : Essais de carottage horizontal.	57
Figure 3.10 : Appareil utilisé.	58
Figure 3.11 : Principe de la méthode Maturométrie.	59
Chapitre 4	
Figure 4.1 : L'appareil d'ultrason.	62
Figure 4.2 : Le principe de la méthode d'ultrason.	64
Figure 4.3 : Méthode directe.	65
Figure 4.4 : Méthode indirecte.	66
Figure 4.5 : Méthode semi-directe.	66
Figure 4.6 : Exemple de relation résistance à la compression du béton vs vitesse de propagation	70
Chapitre 5	
Figure 5.1 : Corps d'épreuve	72

Figure 5.2: Schéma de l'opération des essais ultrasoniques.	73
Figure 5.3: Photo de l'opération des essais ultrasoniques.	74
Figure 5.4: Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (10 cm).	75
Figure 5.5: Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (13 cm).	75
Figure 5.6: Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (15 cm).	76
Figure 5.7: Moule de confection des éprouvettes 7×7×28 cm	82
Figure 5.8: Gachée du mortier.	84
Figure 5.9: Mortier après arasement.	84
Figure 5.10: Mortiers 7×7×28 cm ³ .	84
Figure 5.11: Position des transducteurs.	85
Figure 5.12: Vitesses à l'ultra-son à 28 jours des mortiers testés.	86
Figure 5.13: % de baisses des vitesses à 28 jours des mortiers testés.	86

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre 1	
Tableau 1.1 : Le pourcentage des différents constituants du béton.	20
Tableau 1.2 : Plages de variations des propriétés mécaniques moyennes des bétons courants.	23
Tableau 1.3 : Relation entre la qualité du béton et l'affaissement.	25
Tableau 1.4 : Différents types d'essais pour Béton et Mortier.	34
Chapitre 3	
Tableau 3.1 : Qualité du béton à partir de la vitesse du son.	54
Chapitre 5	
Tableau 5.1 : Vitesses des ultrasons des éprouvettes témoins.	76
Tableau 5.2 : Calcul de la vitesse de son de dosage 350 Kg/m ³ .	77
Tableau 5.3 : Calcul de la vitesse de son de dosage 400 Kg/m ³ .	78
Tableau 5.4 : nature des matériaux utilisé et leur provenance pour la formulation N°01.	79
Tableau 5.5 : nature des matériaux utilisé et leur provenance pour la formulation N°02.	79
Tableau 5.6 : nature des matériaux utilisé et leur provenance pour la formulation N°03.	80
Tableau 5.7 : Résultats des essais aux ultrasons pour les trois formulations.	81
Tableau 5.8 :Nomenclature des compositions de mortiers testés	83
Tableau 5.9 : Compositions des mortiers en gramme.	83
Tableau 5.10 : Vitesses à l'ultra-son (m/s) obtenues à 28 jours	85

Introduction générale

Dans notre domaine de «génie civil» le béton et le mortier sont des matériaux les plus largement utilisés depuis longtemps à cause de ces avantages économiques et techniques.

La résistance de ces deux matériaux peut dégrader sous les sollicitations d'exploitation ou d'environnement.

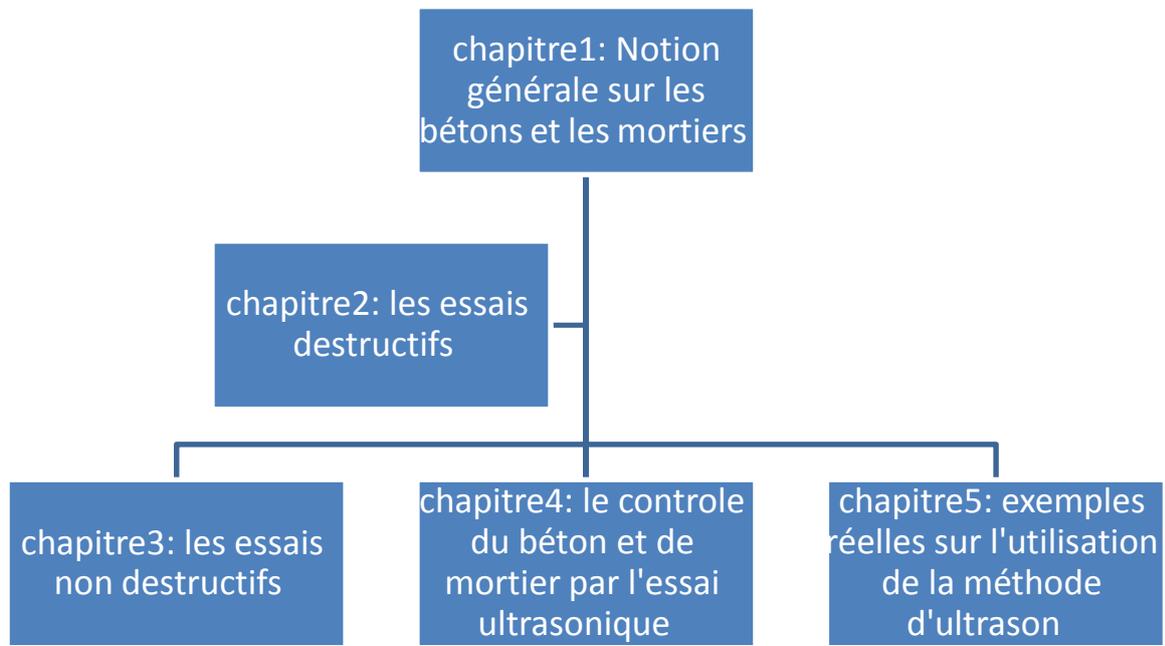
Traditionnellement, et pour vérifier la résistance de ces matériaux on utilise plusieurs méthodes normalisées, ce sont les méthodes destructives (essai de compression; essai de traction ...etc); mais ces essais ont beaucoup des inconvénients: L'échantillon est non représentatif, la - non qualification de la main d'œuvre, l'absence de contrôle strict et continu, la difficulté de maintenir une formulation constante pendant la mise en œuvre du béton, les propriétés de résistance d'une éprouvette de béton dépendent de sa grosseur et de sa forme.

Maintenant le contrôle de matériaux développe au lieu des essais destructifs on utilise les essais non destructifs qui sont plus pratique et plus facile.

Les essais les plus couramment utilisées sont :

- Les ultrasons UPV
- Le scléromètre ou rebound-hammer RH

- Notre étude est divisé en 5 chapitres :



CHAPITRE 1

NOTIONS GENERALES SUR LES

BETONS ET LES

MORTIERS

Introduction

- Le béton est le matériau le plus largement utilisé depuis plus d'un siècle, aussi bien dans le génie civil que dans le bâtiment, plus que tous les autres matériaux réunis.
- Le mortier est l'un des matériaux de construction que l'on utilise pour solidariser les éléments entre eux et assurer la stabilité de l'ouvrage.
- Ce chapitre est composé de deux parties: dans la première partie on a défini le béton et dans la deuxième partie on a défini le mortier.

1. Le béton

1.1. Définition du béton

Le béton est un composite qui résulte d'un mélange intime de liant et des granulats durs de diverses dimensions, d'ajouts minéraux et de faible quantité d'adjuvant. [B.B] Dans les bétons courants, les granulats sont des grains de pierre, sable, gravier, cailloux et le liant est un ciment. Ces constituants sont dosés de manière à obtenir, après le durcissement, un produit solide dont les capacités de résistance dépassent celles des meilleures roches naturelles. Cette roche artificielle résiste bien à la compression et mal à la traction, C'est pourquoi son utilisation ne s'est véritablement développée qu'avec l'invention du béton armé, ce qui a permis de compenser son insuffisance de résistance à la traction.

1.2. Les différents types de béton [NET1] ; [B M]; [A.B] [R.I] [B.W]

- **Le béton armé** est composé d'une armature en acier recouverte de béton.
- **Le béton fibré** est renforcé de fibres synthétiques ou métalliques qui renforcent sa traction ou sa tenue au feu.
- **Le béton précontraint** consiste à mettre en tension des câbles en acier avant la prise, ce qui va comprimer le béton une fois solidifié.
- **Le béton Haute Performance (BHP)** est utilisé pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt. Elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 MPa pour les bétons

à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP).

- **Le béton auto plaçant** est plus fluide que le béton classique et présente donc l'avantage de pouvoir être coulé dans un coffrage sans vibration (technique utilisée pour éliminer les bulles d'air).
- **Béton prêts à l'emploi (BPE):** bétonnage soignée en usine (préfabrication).
- **Béton usuels ou courant.**

Il existe également de nombreux bétons décoratifs, comme le béton lavé ou désactivé (à l'aspect granuleux, utilisé par exemple pour réaliser des allées), le béton ciré, coloré ou même translucide. Des bétons dépolluants ou autonettoyants ont également été mis au point.

1.3. Formulation[SH];[Dreux and Fiesta 1998, De Larrard 2000].

Les bétons sont conçus suivant une formulation, donnée sous forme de quantité massique de chaque composant afin d'obtenir un volume de 1m^3 de béton.

Il existe différentes méthodes de formulations, qui visent à optimiser l'empilement des différentes particules (grains de ciment, sable, gravillons) afin de minimiser les espaces vides [Dreux and Fiesta 1998, De Larrard 2000]. Le choix de la formulation permet d'obtenir des propriétés mécaniques ou de mises en œuvre recherchées. Le mélange des différents constituants du béton lors de sa fabrication s'appelle une gâchée". L'eau du mélange hydrate progressivement le ciment. La pâte de ciment hydratée forme alors un matériau poreux qui solidarise le sable et les granulats entre eux et le matériau acquiert ses propriétés mécaniques. On appelle "cure" le moyen utilisé pour protéger le béton des échanges avec l'extérieur (en particulier le séchage) afin d'assurer la prise puis le durcissement de manière optimale, la cure est particulièrement importante pendant le jeune âge du béton. On ne considère traditionnellement que les propriétés mécaniques finales du béton atteintes au bout de 28 jours. Ces propriétés évoluent en fait continûment et ne peuvent être considérées comme réellement stabilisées qu'au bout de 90 jours ou plus.

1.4. Les constituants d'un béton

1. Le ciment [T.K]

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine

s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte faisant prise qui durcit progressivement à l'air ou dans l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. Le ciment est composé essentiellement de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO), de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3). La chaux nécessaire à la fabrication du ciment est extraite de la roche calcaire ; l'alumine, la silice et l'oxyde de fer sont extraits de l'argile. Le calcaire et l'argile contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ et MgO , l'oxyde ferrique.

Classes de résistance des ciments courants : La résistance normale d'un ciment est la résistance mécanique à la compression mesurée à 28 jours, conformément à la norme NF EN 196 – 1, elle est exprimée en MPa. Pour chaque type de ciment, trois classes de résistance sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours, ces classes sont notées ; 32,5 ; 42,5 et 52,5.

2. Les granulats [B.A] [D.I]

On appelle granulat un matériau granulaire utilisé dans le domaine de construction, soit lié à d'autres substances (liant, bitume) pour obtenir mortier, bétons, bétons routiers ...etc. Les granulats, sont tout matériau inerte qui entre dans la composition des bétons. C'est l'ensemble des grains compris entre 0 et 125 mm, les granulats vont des fillers, sables, graviers, aux cailloux. La provenance des granulats peut être naturelle, de transformation (artificielle) et pour ces dernières années de recyclage. On distingue quatre catégories de granulats en fonction de leur provenance :

- Les granulats d'origine alluvionnaire, ils sont considérés comme roulés, ou semi concassés.
- Les granulats de roches massives; appelés aussi granulats concassés.
- Les granulats de transformation ayant subi des transformations physico-chimiques.
- Les granulats de recyclage.

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

- Sable 0/D ou $1 < D < 6.3$ mm
- Graves 0/D ou $D > 6.3$ mm

- Gravillon d/D ou $D \leq 125$ mm

3. L'eau de gâchage

Elle joue 2 rôles essentiels :

- ✓ Elle participe activement à l'ouvrabilité du béton frais en lui donnant une fluidité satisfaisante pour la mise en place, grâce à son action lubrifiante sur les différents grains, et grâce à la cohésion de la pâte résultant de l'association des grains fins avec l'eau. Il ne faut cependant pas abuser de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton. [NET 3]
- ✓ Elle confère la maniabilité du béton à l'état frais et assure l'hydratation du ciment et donc de la résistance mécanique. [BA.B]

4. Les adjuvants [NET 3]

Les adjuvants sont de plus en plus utilisés. Ils ont permis des progrès considérables en matière de bétons spéciaux (ex : bétons à hautes performances, bétons autoplaçants). Ce sont des produits dont l'incorporation à faible dose (inférieure à 5% de la masse de ciment) aux bétons, mortiers ou coulis lors du gâchage, modifie leurs propriétés à l'état frais et/ou à l'état durci. Voici les principaux adjuvants utilisés dans les bétons :

- Les plastifiants/réducteurs d'eau
- Les super plastifiants/hauts réducteurs d'eau
- Les accélérateurs de prise et de durcissement
- Les retardateurs de prise
- Les hydrofuges de masse

On va présenter dans le tableau suivant le pourcentage des constituants de béton :

CONSTITUANTS	VOLUME (%)	Poids (%)
Ciment & additions	7 – 14	9 – 18
Granulats	60 – 70	65 – 85
Eau	14 – 22	5 – 9
Adjuvants	0 – 2	2
Air	1 – 6	–

Tableau 1.1 : Le pourcentage des différents constituants du béton [NET 3]

1.5. Les propriétés mécaniques

Le béton résiste bien à la compression et grâce à cette grande résistance il est devenu un matériau irremplaçable. Cette résistance nous permet aujourd'hui de construire des immeubles en béton et d'utiliser ce matériau pour résister à d'énormes contraintes par contre le béton résiste mal à la traction (presque 10% de la résistance à la compression du béton).

➤ 1.5.1. La résistance à la compression

La résistance à la compression est la caractéristique la plus importante qu'on recherche dans la fabrication d'un béton durci. C'est sur elle que se basent le calcul et le dimensionnement d'une structure en béton. Le classement du béton se fera à partir de leur résistance à la compression dans 28j.

- **La résistance à la compression a (j) jour notée par [NET 4]**

$$f_{cj} = \frac{j \cdot f_{c28}}{4.76 + 0.83j} \quad \text{pour } f_{c28} \geq 40 \text{ MPa}$$

$$f_{cj} = \frac{j \cdot f_{c28}}{1.40 + 0.95j} \quad \text{pour } f_{c28} < 40 \text{ MPa}$$

- **Relation entre la résistance et le module élastique [S.S] [H.H]**

- ✓ **Déformations instantanées (E_{ij})**

Sous des contraintes normales d'une durée d'application inférieure à 24 heures, on admet à défaut de mesures, qu'à l'âge de j jours, le module de déformation longitudinale instantané du béton (différées >24 h) E_{ij} est égal à 3700 (f_{cj})

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

- ✓ **Déformations différées (E_{vj})**

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

$$E_{vj} = (3700 (f_{cj}))/3 \quad \text{ou} \quad E_{vj} = E_{ij}/3$$

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

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

- ✓ L'âge du béton ;
- ✓ La nature et le dosage en ciment ;
- ✓ La nature minéralogique des granulats ;

- ✓ L'adhérence de la pâte aux granulats (interface (ciment/granulat)) ;
- ✓ Le dosage en eau ;
- ✓ La température ;
- ✓ L'humidité ;
- ✓ Les conditions de mise en œuvre et la qualité du contrôle sur chantier.

➤ 1.5.2. La résistance à la traction

La résistance à la traction on peut dire la résistance à la rupture est une caractéristique du matériau pour l'évaluation du comportement de résistance. La résistance à la traction est la contrainte de traction mécanique maximale avec laquelle une éprouvette peut être chargée.

- **La résistance à la traction a (j) jour notée par**

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06f_{cj}. \quad \text{Pour } f_{cj} < 60 \text{ MPa.}$$

Avec : f_{tj} et f_{cj} sont exprimées en MPa (ou N/mm²).

➤ 1.5.3. La porosité

Une autre propriété importante du béton est la porosité. Elle est définie comme le Volumetotal des vides contenus dans le béton pour 1 m³ de matériau. Cette porosité augmente avec lerapport E/C et est en général comprise entre 11 et 18%. Elle est constituée de pores plus oumoins interconnectés, ainsi que de micro ou macro-fissuration. Les dimensionscaractéristiques des pores vont d'une dizaine de nanomètres (10⁻¹⁰) au millimètre (10⁻³). Ils peuvent être remplis d'air ou d'eau libre suivant la teneur en eau libre du béton. Cette teneur en eau libredésigne l'eau présente dans les vides du béton et ne participant pas à l'hydratation du ciment. On recherche particulièrement une faible porosité lors de la formulation du béton, qui assure une meilleure résistance mécanique du béton. La porosité du béton dépend du rapport E/C, un rapport E/C élevé induisant une plus forte porosité, mais également des conditions de cure ; l'hygrométrie doit être maintenue élevée pendant la cure afin d'assurer la meilleure hydratation possible du ciment, de même une augmentation de la durée de cure diminue lediamètre moyen des pores [Neville 2000, Baron et Sauterey 1982].

R_c (MPa)	R_t (MPa)	E(GPa)	ν	P (kg.m-3)
12-60	1-5	20-40	0.15-0.30	2200-2400

Tableau 1.2 : Plages de variations des propriétés mécaniques moyennes des bétons courants, D'après Dreux and Fiesta [1998][S.H]

1.6. Les caractéristiques du béton

Le béton a un comportement évolutif. Sa fluidité qui nous permet de prendre toutes les formes possibles, puis progressivement il devient dur et très résistant.

➤ 1.6.1. Béton frais

Cette fois il s'agit de mesurer la fluidité du béton lorsqu'il est encore frais. L'objectif est d'ajuster le dosage en fonction de l'utilité du béton. Pour effectuer cette mesure on va utiliser le test d'affaissement au cône d'Abrams Et avec ce test ont vérifié la maniabilité du béton (qualité du béton).

1.6.1.1. Test au cône d'Abrams

Ce test consiste simplement à déposer dans un cône en métal de dimension (10cm*20cm*30cm) le béton frais puis de le renverser pour démouler le béton et ainsi mesurer l'affaissement du béton. L'affaissement du béton donne une appréciation sur sa maniabilité. La mise en place du béton dans le moule se fait en 4 couches d'épaisseurs égales, piquer à l'aide d'une tige à raison de 25 coups pour chaque couche.

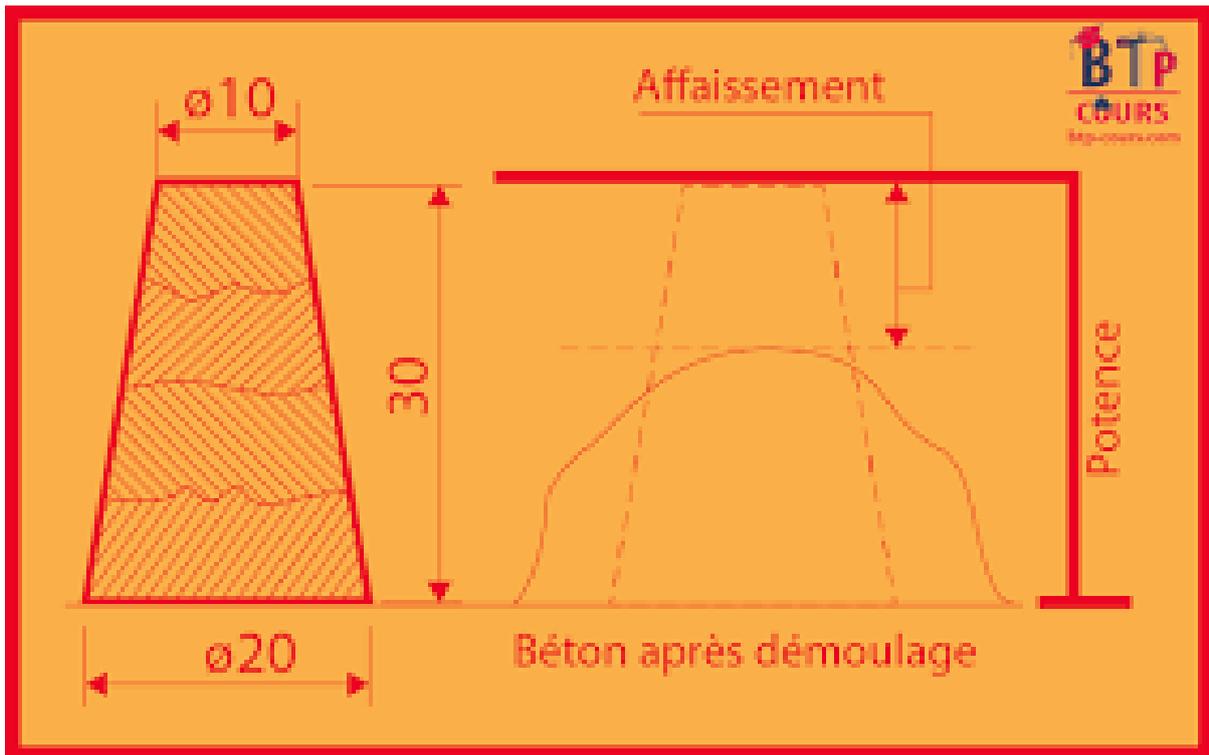


Figure 1.1 : Dimensionnement du cône métallique d'Abrams



Figure 1.2 : mesure de l'affaissement au cône d'Abrams

Et le tableau suivant donne la relation entre la qualité du béton et l'affaissement : [NET2]

Affaissement en mm	Classe de consistance	Définition	Exemple
De 10 à 40 mm	S1	Béton ferme	Escalier, voirie...
De 50 à 90 mm	S2	Béton plastique	Dalle pleine...
De 100 à 150 mm	S3	Béton très plastique	Dalle, fondation...
De 160 à 210 mm	S4	Béton fluide	Dalle fondation voile...
Supérieur à 220 mm	S5	Béton très fluide	Dalle fondation ...

Tableau 1.3 : Relation entre la qualité du béton et l'affaissement

➤ **1.6.2. Béton durci :** Le béton durci a plusieurs caractéristiques [NET3]

Résistance mécanique: la résistance à la compression c'est la résistance la plus importante pour le béton, elle est couramment mesurée sur des éprouvettes cylindriques. Les bétons usuels présentent des résistances comprises entre 25 et 40 MPa. Au-delà de 50 MPa, on parle de bétons hauts performances (50 MPa correspondent à une force de 50 tonnes agissant sur un carré de 10 cm de côté).

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



Figure 1.3 : Essai de compression du béton

La durabilité : le béton offre une grande pérennité face aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (gel, pluie et pollution atmosphérique...). Il est particulièrement adapté pour la réalisation d'ouvrages devant résister à des conditions difficiles et extrêmes.

La porosité et la compacité : ces propriétés conditionnent les deux premières. Plus un béton est compact (et moins, il est poreux), plus ses performances seront élevées et sa durabilité importante. On améliore la compacité du béton en optimisant la dimension et l'empilement des granulats et en réduisant la quantité d'eau.

La tenue au feu:Le béton est connu pour sa très bonne réaction au feu – incombustible, non-inflammable, sans rejet de fumée ni de gaz toxiques – et sa bonne résistance au feu – maintien de la capacité portante sous l'effet du feu – ce qui en fait le matériau d'excellence pour des constructions ignifugées.

La capacité d'isolation thermique et acoustique: Par sa masse, le béton est un excellent isolant phonique aux bruits aériens (conversation, télévision, chaîne stéréo...). Selon sa structure ou la texture de sa surface, il devient également un absorbant acoustique. La conjugaison masse/structure peut conduire à une réduction de bruit de l'ordre de 50 à 60 dB.

La résistance au choc:En cas de choc, ce matériau est aussi reconnu pour ses performances mécaniques : ductilité, bonne tenue en flexion, résistance à la pression... Le béton se positionne comme le matériau remplissant tous les critères en matière de protection contre le feu et les chocs.

2. Le mortier

2.1. introduction^[NET4]

Dans toute construction, il est indispensable de réunir entre eux les différents éléments (blocs de béton, briques, éléments en béton préfabriqué, etc.) au moyen d'un mortier de ciment ou d'autre liant qui a pour but de: Solidariser les éléments entre eux; Assurer la stabilité de l'ouvrage; Comblent les interstices entre les blocs de construction. Le mortier est obtenu par le mélange d'un liant (chaux ou ciment), de sable, d'eau et éventuellement d'additions. Des compositions multiples de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres: liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement. La durée de malaxage doit être optimum, afin d'obtenir un mélange homogène et régulier. Les mortiers peuvent être:

- préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants y compris les adjuvants.
- préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs préposés et avant l'utilisation, il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire.
- livrés par une centrale: ce sont des mortiers prêts à l'emploi. Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années; permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers.

2.2. Les composants^[B.N] ^[Z.A]

Le mortier est formé du ciment; de l'eau; du sable; des adjuvants et éventuellement des additions. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature et les pourcentages des constituants, le malaxage, la mise en œuvre et la cure.

Les mortiers sont constitués par des mélanges de:

Les liants

On utilise généralement: les ciments normalisés (gris ou blanc); les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..); les liants à maçonner; les chaux hydrauliques naturelles; les chaux éteintes

Les sables

On utilise les sables normalisés. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent entre les gros grains pour remplir les vides aussi ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées et même le prix.

Certains sables sont à éviter, notamment les “sables à lapin”, généralement très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes .

Le diamètre maximum des grains de sable utilisés pour les mortiers est:extra-fins: jusqu’à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);fins: jusqu’à 1,6 mm;moyens: jusqu’à 3,15 mm;gros: jusqu’à 5 mm.

Les adjuvants

On ajoute les adjuvants pour faire modifier les propriétés des mortiers auxquels ils sont ajoutés en faible proportion (environ de 5% du poids de ciment). Les mortiers peuvent comporter différents types d’adjuvants:les plastifiants (réducteurs d’eau);les entraîneurs d’air; les modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs).

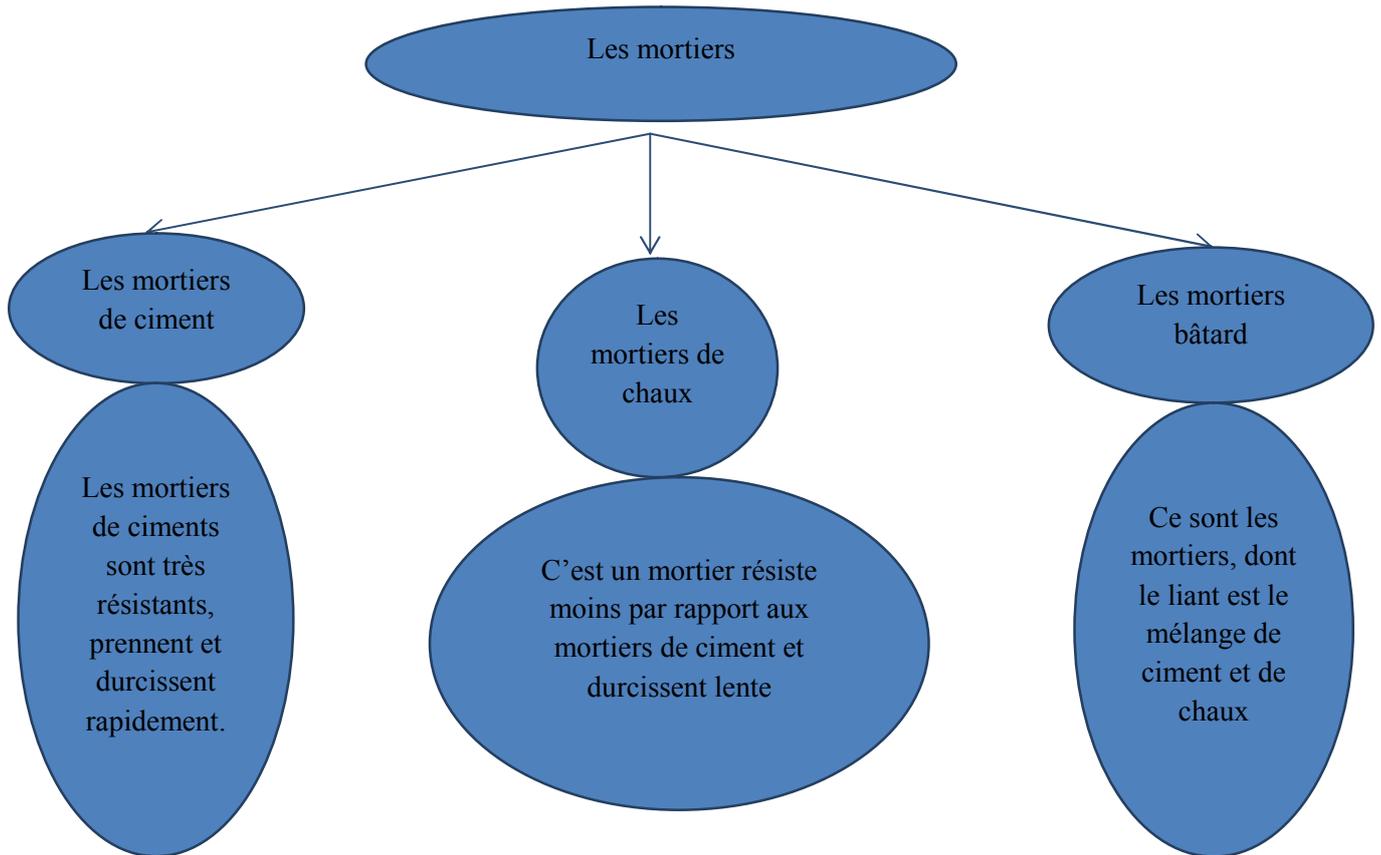
Les ajouts

Les ajouts que l’on utilise dans les mortiers sont:

Poudres fines (cendres, fumée de silice..);fibres de différentes natures; colorants (naturels ou synthétiques);polymères.

2.3. Les types des mortiers

Il y a plusieurs types de mortier qu'on résume dans le schéma qui suit :



❖ On a aussi des mortiers fabriqués sur chantier et des mortiers industriels : [NET4]

- **Mortiers fabriqués sur chantier**

Ils sont préparés avec le ciment et le sable du chantier. Le ciment est un ciment courant CPA ou CPJ et parfois des ciments spéciaux comme le ciment alumineux fondu. On emploie également des chaux hydrauliques et parfois des liants à maçonner. Le sable est le plus souvent roulé (nature silico-calcaires) parfois concassé et le gâchage s'effectue à la pelle ou à l'aide d'une petite bétonnière. Ces mortiers ne sont donc pas très réguliers et les sables peuvent être différents d'une livraison à l'autre, mais de toutes façons ils doivent être propre et de bonne granulométrie. Le sable est généralement dosé en poids (ce qui est préférable), soit en volume (cas des petits chantiers). Dans ce dernier cas, il est très important de tenir compte du phénomène de foisonnement des sables.

- **Mortiers industriels**

Ce sont des mortiers que l'on fabrique à partir de constituants secs, bien sélectionnés, conditionnés en sacs, contrôlés en usine et parfaitement réguliers. Pour utiliser ce type de mortiers, il suffit de mettre la quantité d'eau nécessaire et malaxer pour ensuite les mettre en

œuvre. Les mortiers peuvent contenir des liants et des sables variés ainsi que certains adjuvants et éventuellement des colorants.

- ❖ Les fabricants de mortiers industriels proposent une gamme complète de produits répondant à tous les besoins:
 - ✓ Mortiers pour enduits de couleur et d'aspect varié,
 - ✓ Mortiers d'imperméabilisation,
 - ✓ Mortier d'isolation thermique,
 - ✓ Mortier de jointoiment,
 - ✓ Mortier de ragréage,
 - ✓ Mortier de scellement, mortier pour chapes,
 - ✓ Mortier-colle pour carrelages, sur fond de plâtre ou de ciment, etc.,
 - ✓ Mortier de réparation.

2.4. Les caractéristiques du mortier

Les caractéristiques principales des mortiers sont:

❖ Ouvrabilité :

L'ouvrabilité d'un mortier se mesure à l'aide de divers appareils. Les plus connus sont:

a) La table à secousses:

Le mortier, après avoir été mis en place et démoulé d'un moule tronconique, reçoit 15 chocs en 15 secondes. On mesure le diamètre de la galette ainsi obtenue. L'étalement en % est donné par la formule:

$$E\% = 100 \frac{D_r - D_i}{D_i}$$

Avec : D_r = diamètre final et D_i = diamètre initial.

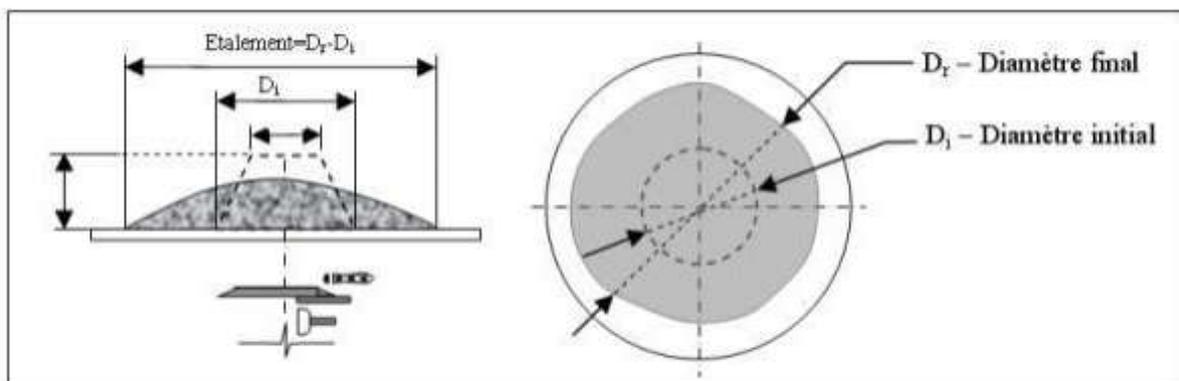


Figure 1.4 : table de secousse

b) Le maniabilimètre

Il est constitué d'un moule parallélépipédique comportant une paroi mobile et un vibreur. Le principe de l'essai consiste, après avoir enlevé la paroi mobile, à mesurer le temps mis par le mortier sous vibrations pour atteindre un repère gravé sur la face intérieure du moule.

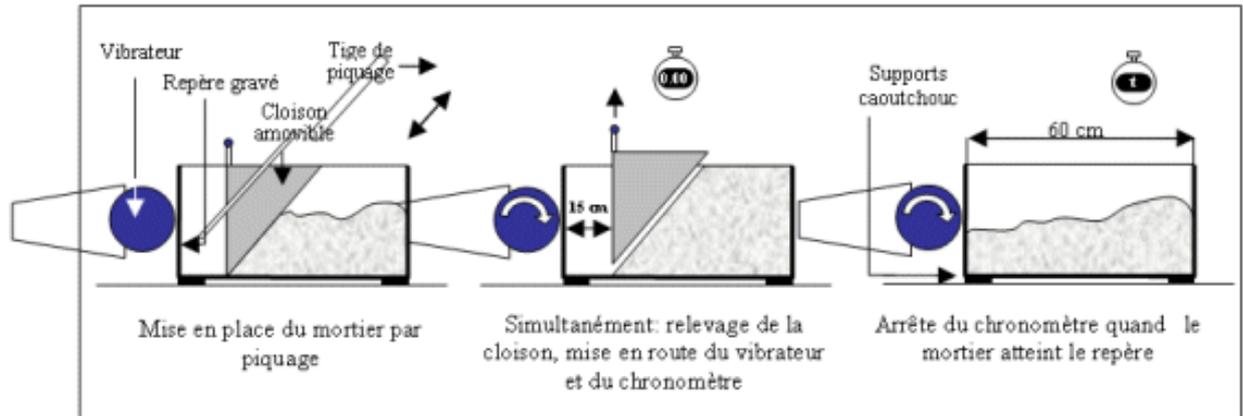


Figure 1.5 : Principe de fonctionnement du maniabilimètre

c) Le cône

Dans le cas d'un mortier fluide, on peut mesurer le temps d'écoulement d'une certaine quantité de mortier au travers d'un ajustage calibré situé à la partie inférieure d'un cône. Le cône peut aussi être muni d'un vibreur.

❖ Le temps de Prise

Le temps de prise se mesure habituellement sur une pâte pure de ciment de consistance normale (24 à 30% d'eau) et conformément à la norme concernée (à l'aide de l'appareil de Vicat). Il est possible d'obtenir (hors norme) le temps de prise d'un mortier avec le même appareillage mais en plaçant une surcharge de 700 grammes sur le plateau supérieur. Le poids de l'aiguille pénétrant dans le mortier est de 1000 grammes. Le début de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du fond (taille des plus gros grains de sable) et la fin de prise est l'instant où l'aiguille s'arrête à 2,5 mm du niveau supérieur.

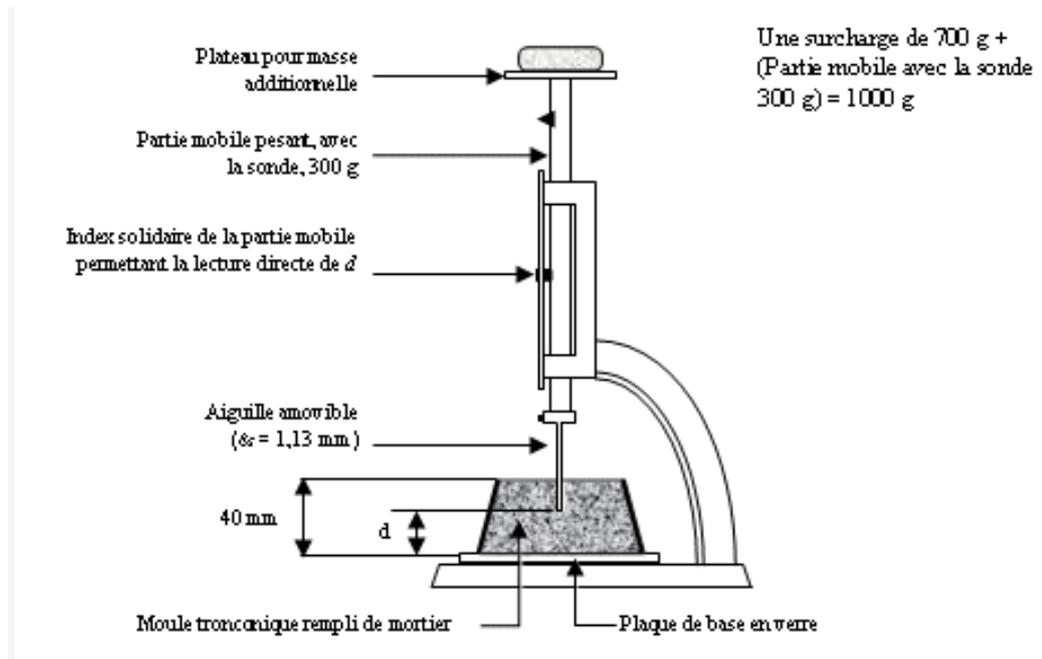


Figure 1.6: Appareil de Vicat muni de l'aiguille avec une surcharge

❖ Résistances mécaniques

Les résistances des mortiers (comme dans le cas des bétons) dépendent de très nombreux facteurs:

- Nature et dosage en ciment.
- Rapport C/E.
- Granulométrie et nature du sable.
- Énergie de malaxage et mise en œuvre.
- Protection les tous premiers jours.

❖ Retraits et gonflements

Les retraits se mesurent sur des prismes 4 x 4 x 16 cm en mortier 1/3, munis de plots à leurs extrémités et conservés, après démoulage, dans une enceinte à 20 °C et à 50 % d'humidité relative. Ce retrait progresse à peu près comme le logarithme entre 1 et 28 jours.

Le mortier prend son retrait plus rapidement que la pâte pure. Le rapport du retrait de la pâte pure sur le retrait du mortier croît avec le temps. Il est de l'ordre de 1,5 à 2,5 les premiers

jours, puis augmente pour atteindre 2,5 à 3,5 en un an. En moyenne, le retrait sur mortier est 2 à 3 fois plus faible que celui de la pâte pure (avec le même ciment).

Le gonflement des mortiers (qui se produisent lorsqu'ils sont conservés dans l'eau) se mesure sur les mêmes éprouvettes de 4 x 4 x 16 cm conservées dans l'eau à 20 °C. Ils sont en général assez faibles (cas de ciment stable ayant une expansion aux aiguilles de le Chatelier inférieure sur pâte pure à 10 mm).



Figure 1.7: Appareillage pour la mesure du retrait

Propriété	Béton	Mortier
Affaissement & Etalement	Cône D'Abrams	Cône D'Abrams (échelle 1 /2)
Viscosité	Temps d'écoulement au V-Funnel	Temps d'écoulement au Cône de Marsh
	Maniabilimètre à béton	Maniabilimètre à mortier
Prise et durcissement	Aiguille de Vicat	Aiguille de Vicat
Résistances	Cylindre ou cubes normalisés	Prismes 4 x 4 x 16 cm, des éprouvettes 7 x 7 x 28cm
...

Tableau 1.4. Différents types d'essais pour Béton et Mortier

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de définir et de mettre en valeurs les caractéristiques des bétons et des mortiers.

- ✓ Le béton a une résistance élevée en compression et une résistance faible en traction.
- ✓ Le mortier a plusieurs caractéristiques : ouvrabilité, résistance mécanique, retraits et gonflement...etc

CHAPITRE 2

LES ESSAIS DESTRUCTIFS

Introduction

Les essais destructifs ont pour but de caractériser le comportement des matériaux en prélevant un échantillon de la pièce pour la soumettre à plusieurs essais afin d'obtenir des informations très précises sous la contrainte et d'en quantifier précisément les déformations. Ces essais sont destructifs. Les mesures des résistances R_c et R_t sont par exemple réalisées avec des presses (compression, traction par fendage, par flexion, etc.).

Les essais destructifs

1. La résistance à la traction

La résistance à la traction est un excellent indice de qualité des matériaux fragiles comme les roches ou les bétons. La résistance à la traction reste cependant l'une des caractéristiques des moins bien définies, notamment à cause de l'absence d'une technique expérimentale qui soit à la fois économique et fiable tout en restant parfaitement rigoureuse au point de vue mécanique. Les nombreuses techniques utilisées pour déterminer cette résistance à la traction sont: Essai de fendage, essai de traction par flexion et essai de traction direct.

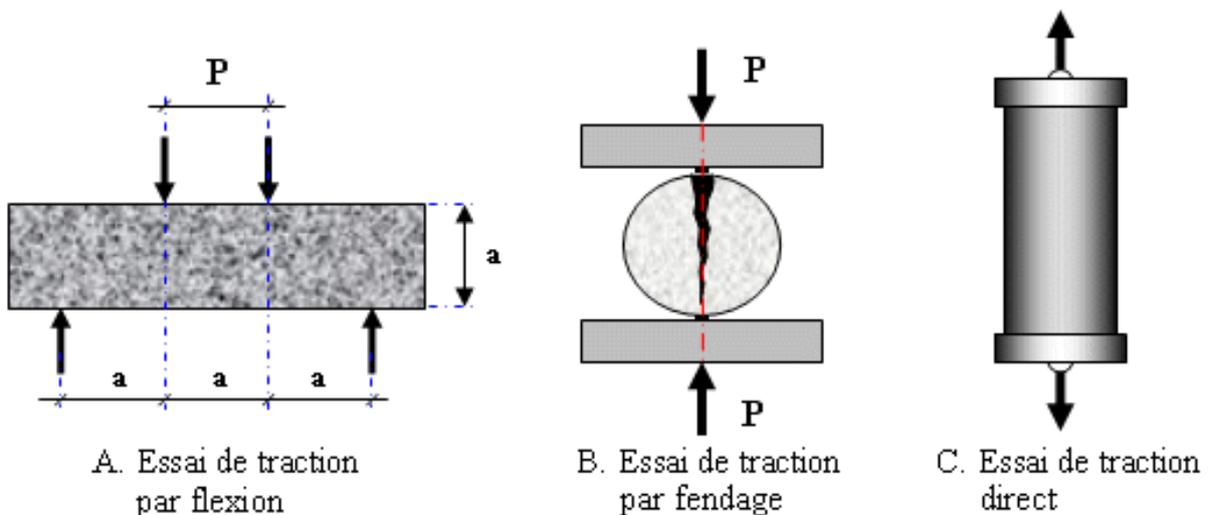


Figure 2.1 : les essais de traction

1.1. Détermination expérimentale

1.2. 1.1.1. Essai de fendage

1. Définition

On peut dire aussi essai de mesnageressai de traction indirecte, essai de traction-écrasement, essai brésilien. Un essai de fendage est réalisé sur des éprouvettes cylindriques obtenu par moulage et provisoirement être exécuté sur éprouvettes cubiques (on l'utilise éprouvette cubique dans le domaine de la recherche). Il permet de déterminer expérimentalement la résistance en traction du béton. L'essai de fendage est facile à effectuer et donne des résultats plus homogènes que les autres essais en traction La résistance mesurée lors de l'essai de fendage semble assez voisine (5 à 12% près) de la résistance du béton déterminée par traction directe.

2. Historique

Cet essai a été imaginé en premier par MESNAGER en France vers 1905 avant d'être repris plus tard par les brésiliens. [B.R] [M.Y]

3. Description de l'essai

L'essai de fendage est un essai de traction indirect consistant à comprimer radialement l'éprouvette, créant alors, par effet Poisson, des contraintes de traction horizontales au sein du matériau. Cet essai fonctionne à condition que l'effet Poisson provoque la rupture du matériau avant les contraintes de compression. On considère en général que la résistance à la traction du matériau doit être plus de trois fois inférieure à sa résistance en compression pour que cet essai permette d'estimer la résistance en traction. C'est le cas pour les bétons ordinaires où le rapport est généralement d'environ dix. [NET5]

4. Principe de l'essai

Le principe de l'essai est de soumettre une éprouvette cylindrique ou cubique rectiligne à une force croissante et constante jusqu'à rupture de celle-ci afin de déterminer sa résistance à la traction par fendage.

- Pour calculer la résistance du béton en traction on utilise les formules suivantes :

Eprouvette cylindrique : $Rfd = \frac{2N}{dl}$

Eprouvette cubique : $Rfd = \frac{2Nk}{a^2}$

Avec :

N : charge de rupture

d : diamètre de l'éprouvette

L : longueur de l'éprouvette K : coefficient qui prend les valeurs suivants 1.3 pour béton légers et 1.1 pour béton lourd

5. Machine d'essai [K.N]

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



Figure 2.2 : essai de fendage

1.1.2. Essai de traction par flexion

C'est la méthode la plus utilisée par rapport aux deux autres essais.

1. Principe de l'essai

L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles et il ne permet pas d'atteindre la rupture des matériaux ductiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

2. Machine d'essai [K.N]

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



Figure 2.3 : Portiques pour essais de flexion

3. Flexion de trois points

Dans cet essai, un prisme de béton, reposant sur deux appuis, est soumis à un effort de flexion; soit par application d'une charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre).

La charge étant placée au centre du prisme, l'essai est dit « flexion à trois points ».



Figure 2.4 : Béton soumis à la flexion 3 points

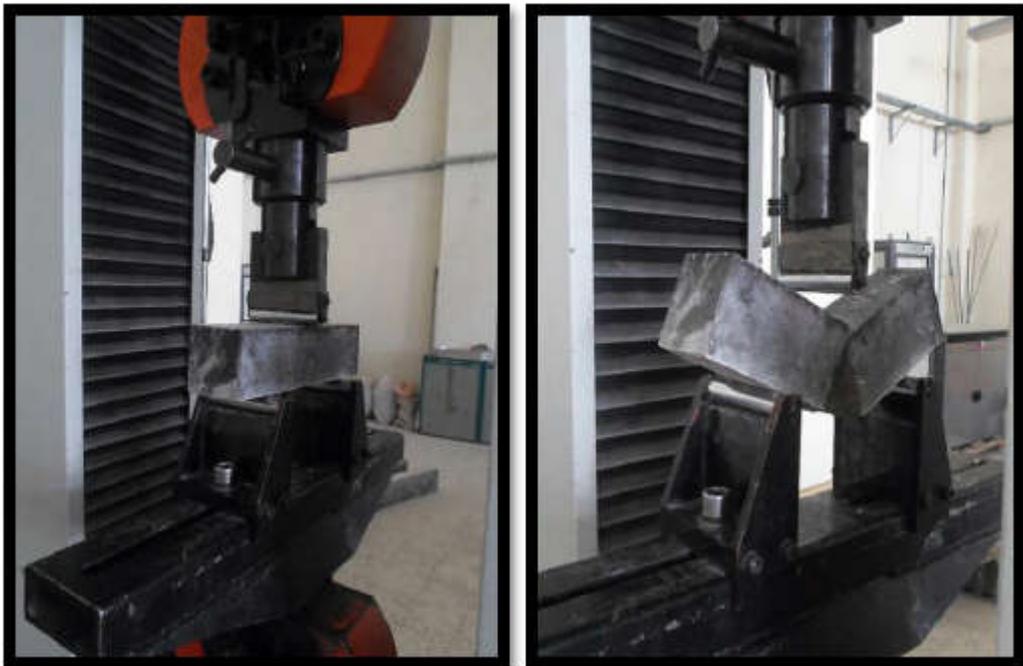


Figure 2.5: Mortier soumis à la flexion 3 points

4. Flexion de quatre points

Dans cet essai, un prisme de béton, reposant sur deux appuis, est soumis à un effort de flexion soit par application :

De deux charges concentrées, symétriques, égales, appliquées au tiers de la portée (moment maximal constant entre les deux charges).

Les points d'applications de la charge étant placés aux tiers de la portée, l'essai est dit «flexion quatre points».



Figure 2.6 : essai de flexion de quatre points

1.1.3. Essai de traction direct

Essai de traction directe est le plus préconisé pour caractériser le comportement d'un matériau sous un effort longitudinal de traction. Cependant, la complexité de la réalisation d'un essai de traction directe sur des éprouvettes en béton fait que cet essai est souvent remplacée par un essai de fendage ou de traction par flexion. [NET6]

L'application directe d'un effort de traction pure, en dehors de toute excentricité, il est très difficile car il nécessite, après sciage des extrémités, le collage de têtes de traction

parfaitement centrées, l'opération devant avoir lieu sans aucun effort de flexion parasite.
[NET7]

1. Principe de l'essai

Le principe de cette essai est de soumettre une éprouvette sur une charge croissante jusqu'à la rupture. Une plaque est collée sur chacune des faces soumises au test, la plaque inférieure étant maintenue à l'aide d'un dispositif de bridage alors que la partie supérieure est tractée à l'aide d'une contreplaque munie d'une rotule.

2. Les inconvénients de l'essai direct [NET7]

1. Il est assez dispersé dans ces résultats, ceci en raison du sciage des extrémités qui crée un affaiblissement dans ces zones, les ruptures se produisent assez souvent dans la zone du collage.
2. En dépit du succès de l'emploi de fixations spéciales, il est difficile d'éviter des contraintes secondaires telles que celles induites par les mâchoires ou par des ancrages noyés. La rupture se fait toujours au niveau des extrémités de l'éprouvette cylindrique.

3. Machine d'essai [K.N]

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

Elle doit être contrôlée et étalonnée conformément à ce document.

2. La résistance à la compression

La résistance à la compression c'est la contrainte maximale admissible par un matériau soumis à une charge d'écrasement on peut dire aussi c'est la capacité d'un matériau ou d'une structure à supporter les charges qui tendent à réduire sa taille par compression.

2.1 L'essai de compression

L'essai de compression s'applique sur des éprouvettes cylindriques obtenues soit par moulage, soit prélevées par carottage dans le béton frais ou durci de l'ouvrage. Cet essai

consiste à appliquer une contrainte de compression sur les éprouvettes cylindriques posées verticalement. Les éprouvettes sont au préalable surfacées afin que le contact avec les plateaux de la presse engendre le moins de frottements possible. L'objectif est d'appliquer une contrainte homogène dans toute la section durant l'essai. Le risque de voir apparaître des concentrations de contraintes, pouvant causer une rupture prématurée de l'éprouvette, est ainsi évité. Le surfacage permet ainsi d'assurer la reproductivité et la fiabilité de l'essai et surtout de diminuer l'effet de frettage. Cet effet est dû à la diminution de l'effet de Poisson due aux frottements entre les plateaux de la presse et l'éprouvette. Les parties en contact se retrouvent ainsi en tri-compression, or une éprouvette en béton résistera mieux à une sollicitation en tri-compression qu'en compression uni-axiale. L'objectif est d'estimer la résistance à la compression uni-axiale. [B.A] [D.I]

1. Machine d'essai [X.J] [H.H] [F.S]

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

Elle doit être contrôlée et étalonnée conformément à ces documents.

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

2. Conduite de l'essai [H.H] [S.S]

- **Mise en place dans la presse**

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Figure 2.7: Mortier soumis à la compression pure

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de comprendre les essais destructifs et de mettre en valeur les principes et la procédure de mesure de ces essais.

CHAPITRE 3

LES ESSAIS NON DESTRUCTIFS

Introduction

Les essais non destructifs sont des méthodes de reconnaissance appliquées aux structures des bâtiments, ouvrage d'art ou de génie civil; leur objectif c'est la mise en évidence de toutes les défauts susceptibles d'altérer la disponibilité et la sécurité d'emploi. Dans ce chapitre on a présenté quelques essais non destructifs avec leurs principes.

Les essais non destructifs

1. Définition

Les essais non destructifs et on dit aussi le contrôles non destructif ; c'est un ensemble des méthodes de reconnaissance qui permettent de vérifier la résistance du béton et de mortier aussi de faire caractériser l'état d'intégrité de la structure ou de matériaux. Ces essais nous permettent de suivre les changements des propriétés avec le temps.

Ces essais sont rapides et faciles à mettre en œuvre, et apportent de surcroît une réponse globale à l'échelle d'une structure ou d'un ouvrage, dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens.[NET8]

2. Avantages de ces méthodes[NET8]

Les méthodes non destructives présentent les avantages suivants :

- La performance ou l'apparence de la structure n'est pas modifiée ;
- La possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps ;
- Une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction ;
- Une progression plus rapide et plus économique.

3. Méthodes d'essais

Il existe plusieurs méthodes pour le contrôle du béton et on va présenter quelques essais :

3.1. Essai au scléromètre(Rebound Hammer-RH)

3.1.1. Définition

C'est un essai utilisé dans le diagnostic des ouvrages déjà construits. Il s'agit de permettre l'obtention de la résistance du béton et aussi pour tester la dureté de surface du béton.



Figure 3.1 : essai au scléromètre.

3.1.2. Objectif de l'essai

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

3.1.3. Principe de l'essai [S.S] [H.H]

Le principe de base de l'essai au scléromètre est que le rebond d'une masse élastique dépend de la dureté de la surface sur laquelle frappe la masse.

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

initiale du ressort est appelée l'indice de rebondissement. Cet indice est indiqué par un curseur qui se déplace le long d'une règle graduée.

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

3.1.4. Appareillage

Le scléromètre, constitué d'un marteau en acier comprimé par un ressort qui, après libération, projette une tige de percussion en acier au contact de la surface de béton. La vitesse de déplacement du marteau produite par le ressort doit être constante et reproductible. Le rebondissement du marteau en acier par rapport à la tige de percussion en acier ou d'autres valeurs de rebondissement doit être mesurée sur une échelle linéaire solidaire du bâti de l'instrument. [S.H]

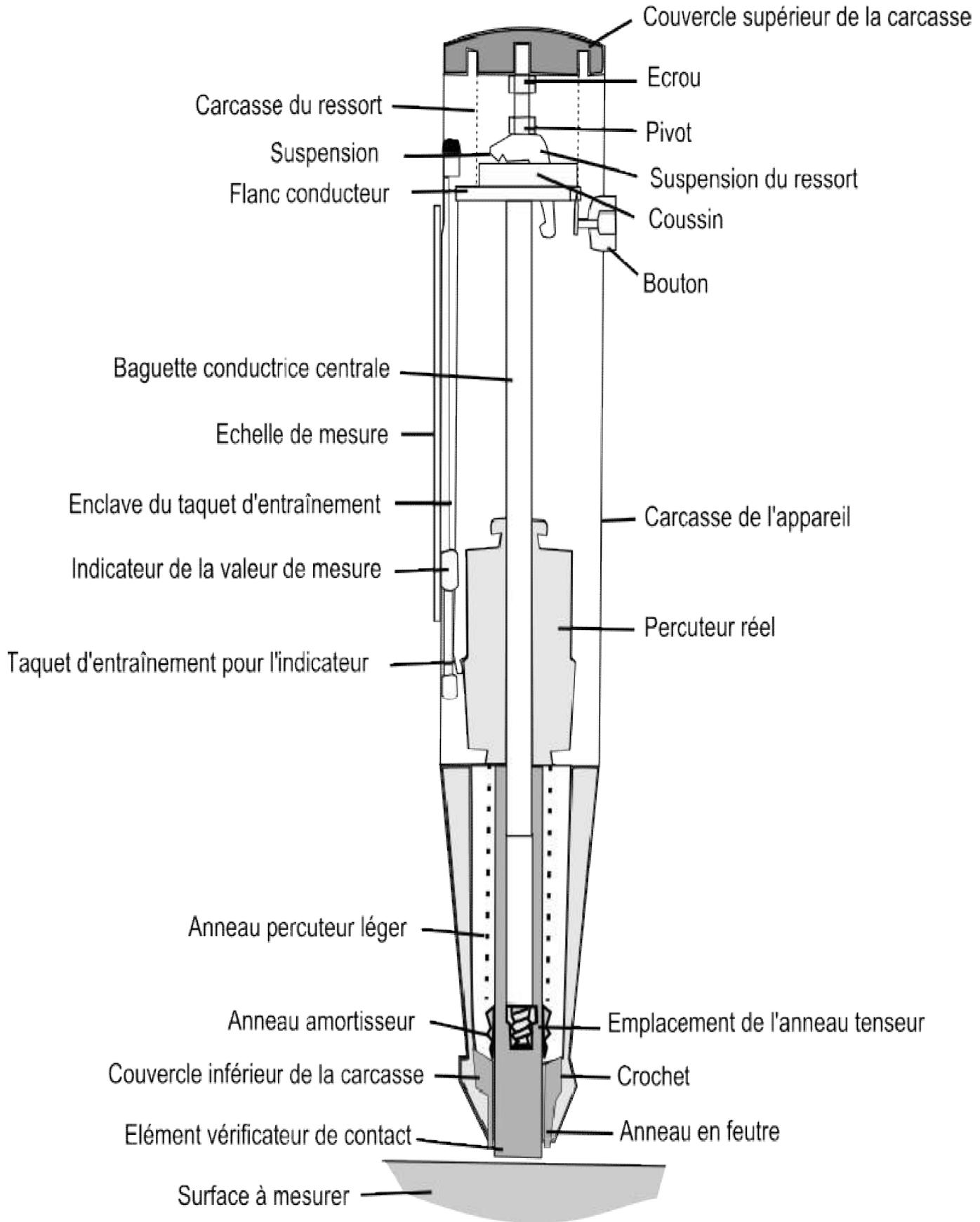


Figure 3.2 : Coupe longitudinale à travers le Scléromètre.

3.1.5. Mode Opérateur [S.S] [H.H]

▪ Préparation de la surface

Les mesures doivent être effectuées sur des surfaces nettes ne présentant pas de nids de gravier, des écaillages, de texture grossière, de porosité élevée ou d'armatures affleurant. La préparation de la surface consiste à éliminer tout enduit ou peinture adhérant ou poncer sicette surface est constituée d'une couche superficielle friable. Toute trace d'eau sur la surface doit être essuyée.

▪ Points de mesures

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm² au moins, et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement $d = 30\div 50$ mm. Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée. Effectuer au moins 10 mesures successives dans la même zone. La surface de cette zone est équivalente à celle d'un carré d'environ 25 cm de côté. Au cours de ces mesures, il convient de ne pas effectuer l'essai à moins de 3 à 4 cm des bords de l'élément testé.

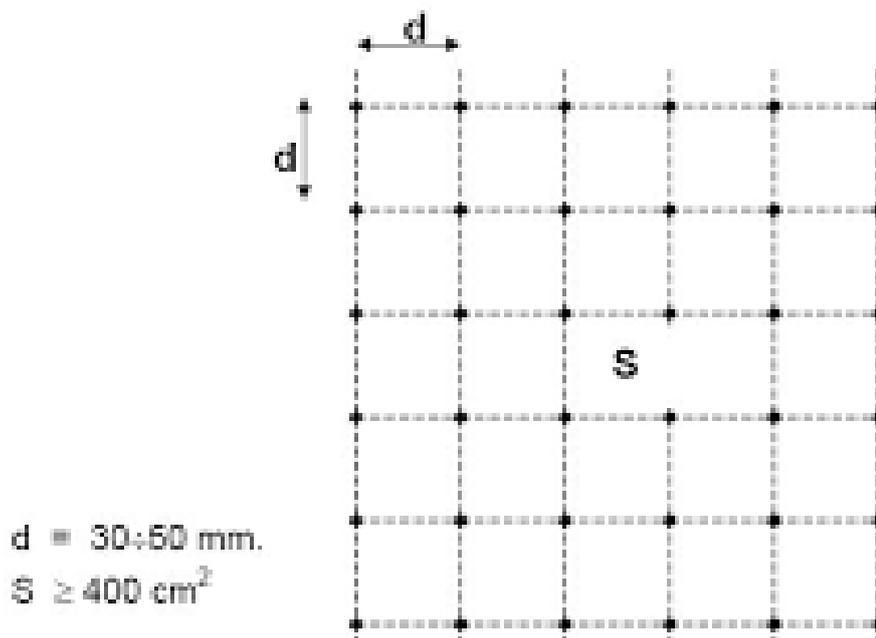


Figure 3.3 : Grille de mesure sur ouvrage.

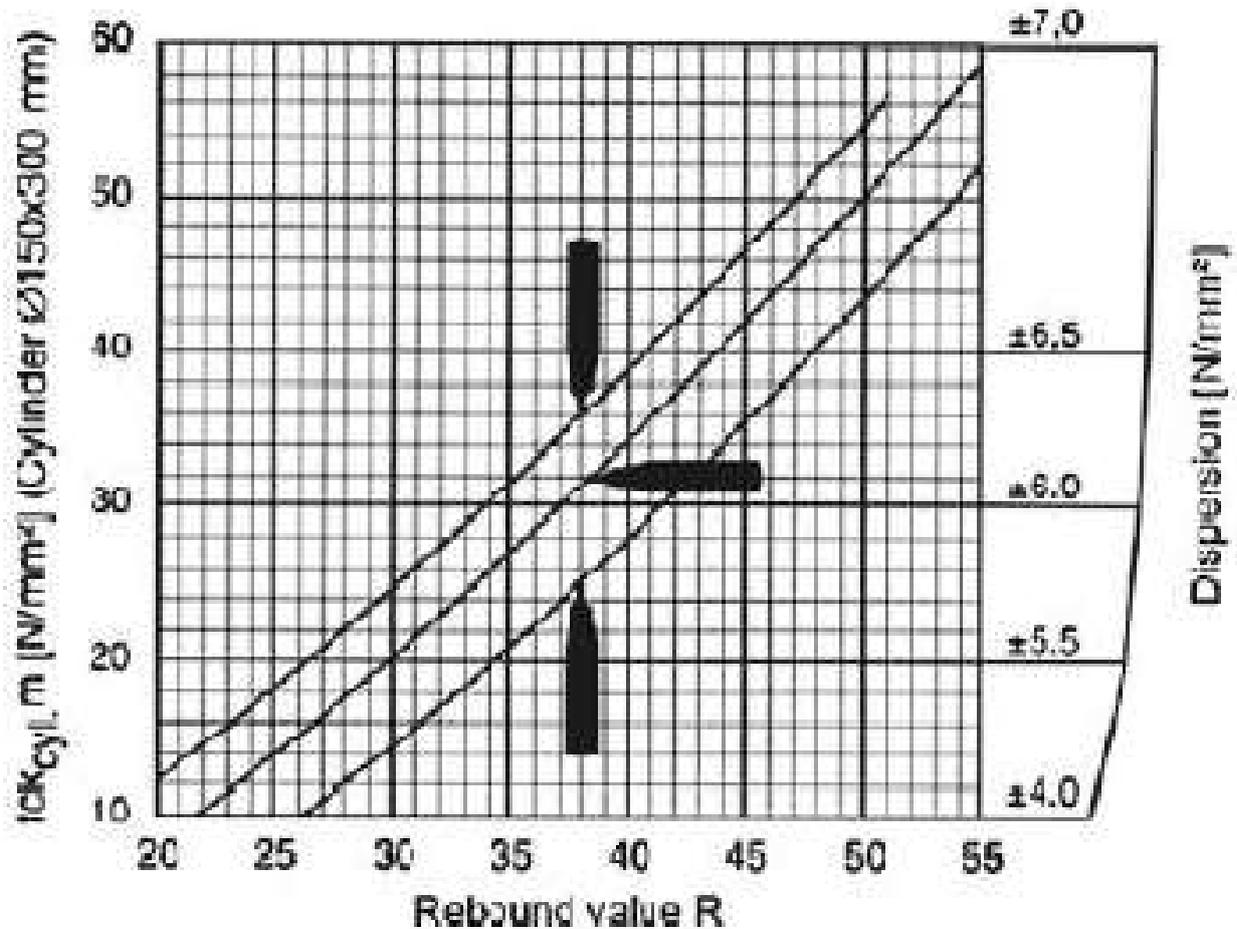


Figure 3.4 : courbe de conversion pour une résistance à la compression moyenne mesurée sur des éprouvettes cylindriques (150×300).

- **Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement**

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

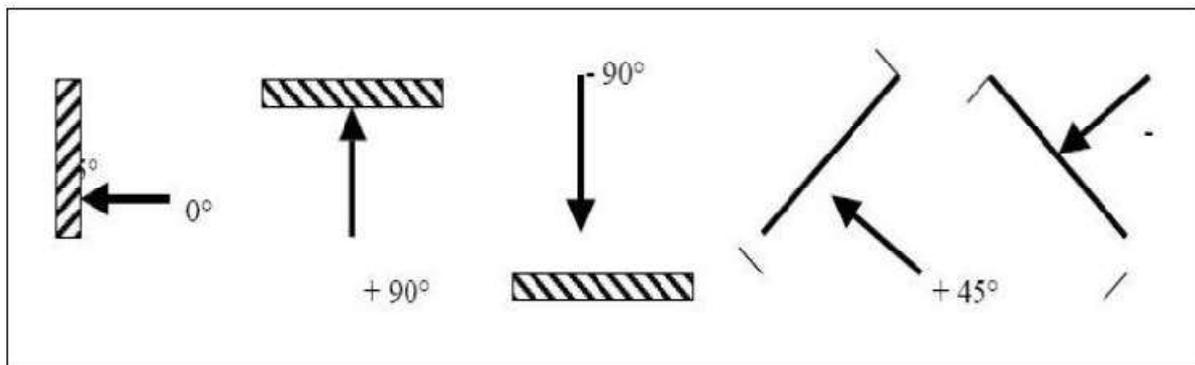


Figure 3.5 : Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter.

3.1.6. Les avantages de la méthode scléromètre[B.A] [D.I]

- C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide
- L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués. Et vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge ;
- L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service ;
- Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface.

3.1.7. Les inconvénients de la méthode scléromètre [B.A] [D.I]

- Une précision entre ± 15 et $\pm 20\%$ n'est possible qu'avec des éprouvettes qui ont été coulées et soumises à un traitement de cure ;
- Les résultats sont influencés par des facteurs tels que l'égalité de la surface, la grosseur et la forme de l'éprouvette ;
- La résistance obtenue n'est que celle de la peau de béton, elle ne renseigne pas sur le béton à l'intérieur de la masse de l'ouvrage ;
- La méthode sclérométrique constitue une voie directe utilisée pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de la surface de l'élément en béton.

Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue nullement une mesure fiable de la résistance du béton compte tenu des paramètres influents la précision de détermination de cette résistance ;

- Plusieurs méthodes sont utilisées pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton.

3.2. Essai d'auscultation dynamique (ultrason)

3.2.1. Définition

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton.



Figure 3.6 : essai ultrasonique sur une poutre.

3.2.2. Principe

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

3.2.3. Expression de la vitesse

La vitesse de propagation du son à travers le béton est déterminée par la formule suivante :

$$V=L/T$$

Avec :

- V : est la vitesse de propagation du son, en km/s.
- L : est la longueur de parcours, en mm.
- T : est le temps que met l'impulsion pour parcourir la longueur.

3.2.4. Classification du béton d'après la vitesse du son

Vitesse du son en m/s	Appréciation de la qualité
> 4500	Excellent
3500 à 4500	Bon
3000 à 3500	Assez bon
2000 à 3000	Médiocre
< 2000	Très mauvais

Tableau 3.1 : Qualité du béton à partir de la vitesse du son

3.3. Essai par radiographie

3.3.1. Définition

Cet essai nous permet de voir la composition interne du béton et ça à travers les rayons X qui sont projetés sur la structure. Le phénomène est exactement le même que ce qui se produit lorsque quelqu'un subit des radiographies d'une partie de son corps. Les éléments les plus denses (exemple les armatures dans le béton) sont facilement visible sur une image de radiographie car ce sont les éléments qui sont les plus claires.

3.3.2. Principes fondamentaux [B.M/A]

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

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

$$I=I_0 -\mu x$$

Avec :

- I : l'intensité du photon transmis.
- I_0 : l'intensité du photon incident.
- μ : le coefficient d'atténuation.
- x : l'épaisseur de l'objet.

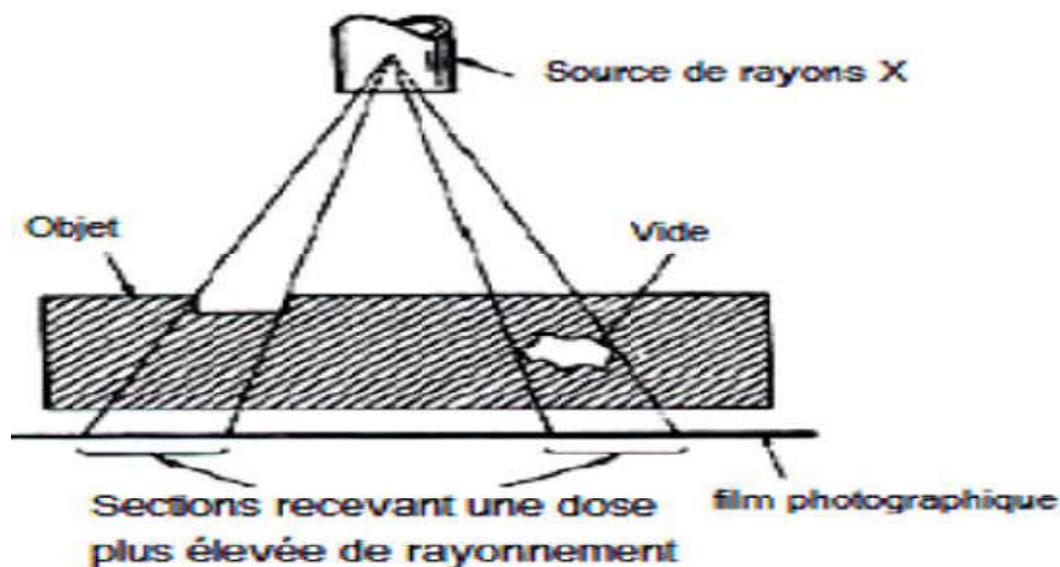


Figure 3.7 : Principe de la radiographie

3.4.Méthode par carottage [S.H]

La méthode par carottage est assez rare. En fait, il est essentiellement pratiqué dans les cas suivants :

- ❖ Soit parce que la structure a subi des dommages par exemple par le feu, surcharges, fatigue et/ou a été dans un environnement agressif....
- ❖ Soit parce que les résultats obtenus lors des épreuves de contrôle de fabrication ne sont pas conformes et qu'il est nécessaire de procéder à des investigations complémentaires pour décider des actions à entreprendre.
- ❖ Avant extraction, les implications possibles du carottage sur les structures doivent être considérées.
- ❖ Les emplacements choisis devront être dénués d'armatures métalliques ou ne présenter que peu d'armatures.
- ❖ Les carottes seront de préférence prélevées à une distance des joints ou des arêtes, suffisante pour ne pas rendre disgracieux ou impossible le ragréage des «trous».

3.4.1. Les types de méthode par carottage

3.4.1.1. Carottage vertical :

Cette méthode utilisée pour les dalles, les tabliers de ponts, les semelles et éventuellement pour les poutres de faible hauteur.



Figure 3.8 : essais de carottage verticale.

3.4.1.2. Carottage horizontal On utilise cette méthode pour les l'âme des poutres de grande hauteur, dans le tiers central des poteaux, des murs, des piédroits.



Figure 3.9 : essais de carottage horizontal.

3.5. Les méthodes thermiques

Dans le domaine du contrôle non destructif d'ouvrages, les méthodes thermiques sont émergentes. L'apparition récente de la thermographie infrarouge (TIR) a permis aux méthodes thermiques de s'immiscer dans le domaine de l'auscultation des ouvrages [Sirieix et al. 2005]. Il s'agit alors de mesurer la réponse d'un ouvrage aux variations de températures naturelles ou artificielles (respectivement pour les méthodes dites passives ou actives). Les mesures sont effectuées dans le domaine spectral de l'infrarouge dit moyen, entre 2 et 15 μm [Gaussorgues 1999].



Figure 3.10 : Appareil utilisé.

3.6. La Maturométrie

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

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

Avec :

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

3.6.1. Méthode d'essai

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

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

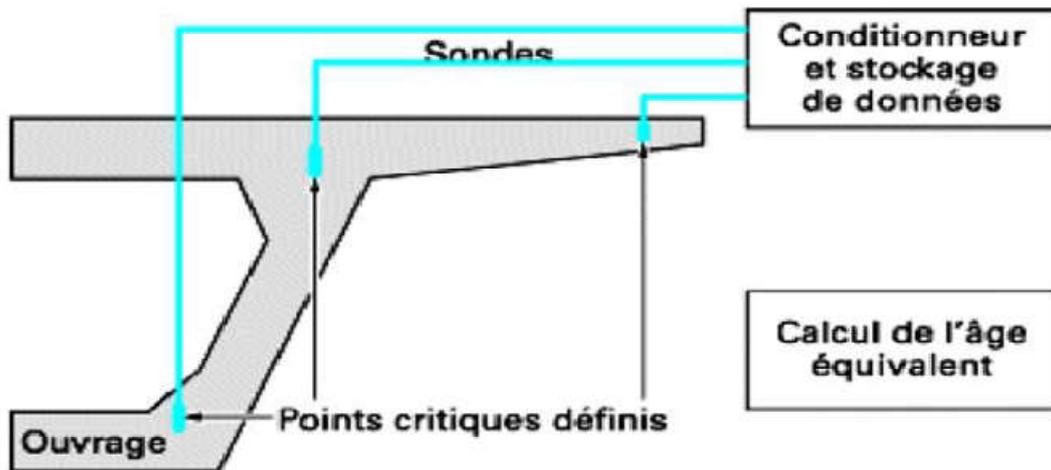


Figure 3.11 : principe de la méthode Maturométrie.

- Les méthodes présentées ci-dessus sont les plus usuelles, nous présentons dans ce qui suit une liste de méthode peu ou pas connus:
 - Thermographie infrarouge;
 - Le Géo rada;
 - Impact-écho;
 - Acoustique non linéaire ;
 - Contrôle par ressuage.

CHAPITRE 4

**CONTROLE DU BETON ET DU
MORTIER PAR LES ULTRASON**

Introduction

Pour le contrôle du béton et de mortier et pour connaître ces caractéristiques on utilise plusieurs essais destructifs et non destructifs, mais dans notre étude on a choisi une méthode non destructive «c'est la méthode d'auscultation dynamique (ultrasons)».

Dans ce chapitre on va définir cette méthode et donner son principe.

L'essai d'auscultation dynamique (ultrasons)

1. Définition

L'essai d'auscultation dynamique connu sous le nom d'essai ultrasonique est une méthode non destructive il consiste à déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales à l'aide d'un générateur et d'un récepteur. Ces essais peuvent être effectués sur des éprouvettes au laboratoire ou sur des ouvrages.

2. Historique^[S.H]

Les méthodes acoustiques sont avec l'inspection visuelle, les plus anciennes formes du contrôle non destructif. Le son est un moyen de détecter la présence des vides, fissures ou délamination.

En 1920, le scientifique russe Sergei Y. Sokolov de l'institut électrotechnique de Leningrad, en ce qui était l'URSS s'est proposé d'abord d'utiliser la vitesse de l'onde ultrasonique (UPV) pour trouver les défauts dans les objets métalliques. Cependant ce n'est qu'en 1942 qu'un réel progrès a été réalisé par Firestone à l'université de Michigan et indépendamment par Sproule en Angleterre [NDT resources center].

Après la seconde guerre mondiale, s'en est suivie une rapide évolution dans l'instrumentation du contrôle non destructif ; l'objectif principal étant la détection des défauts. En réponse à ce besoin des techniques de plus en plus sophistiquées utilisant les ultrasons ; courant de Foucault, radiographie... sont apparues.

C'est au début des années 1970 avec l'amélioration de la technologie, l'apparition de la mécanique de rupture et le développement de nouvelles lois pour prédire le taux d'évolution des fissures dans le béton sous chargement cyclique (fatigue) qu'un réel et majeur changement se produit dans le domaine du NDT.

3. descriptif de l'appareil

L'appareil d'ultrason est un outil essentiel pour étudier l'intégrité structurale d'un large matériau de gamme. Il se compose d'une unité centrale; deux transducteur (émetteur et récepteur); deux câbles de liaison ; un câble d'alimentation ; un pot de vaseline ; une barre étalon.



Figure 4.1 : l'appareil d'ultrason.

4. Principe

Le contrôle sonore par ultrasons consiste à générer à l'aide d'un émetteur piézoélectrique une onde mécanique de compression dans la structure à ausculter, à recevoir à l'aide d'un

récepteur l'onde qui se propage dans tout l'élément et à analyser ses paramètres physiques en différents points de la structure (temps et amplitude).

La technique de contrôle par Ultrasons la plus couramment utilisée est **l'écho pulsé** ; le son est introduit dans un objet à contrôler et les réflexions (les échos) des imperfections internes ou des surfaces géométriques de la pièce inspectée sont renvoyées à un récepteur.

Les essais consistant à mesurer la vitesse de propagation des impulsions peuvent être effectués sur des éprouvettes de laboratoire comme sur des ouvrages en béton terminés.

Certains facteurs influents toutefois sur la prise de mesures [S.S] [H.H]

- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984)
- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.
- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température.
- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse (BUNGEY (1989)). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

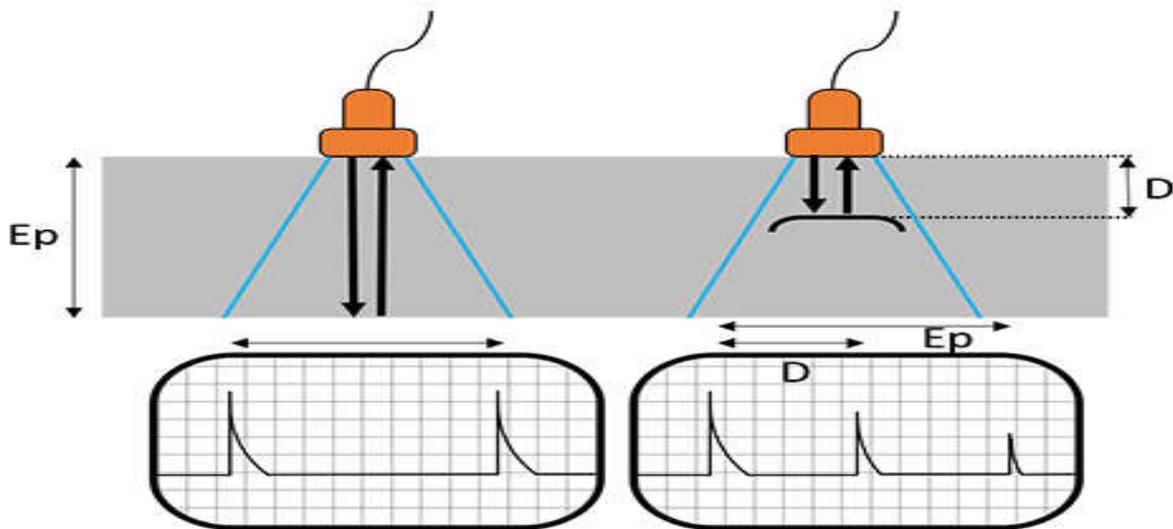


Figure 4.2 : le principe de la méthode d'ultrason.

✓ **Mesure du temps de propagation et de la longueur de parcours:**

En transmission directe et semi-directe, la vitesse de propagation sera calculée selon la formule :

$$V = L / T$$

Avec :

V : la vitesse conventionnelle de propagation, en km/s
 L : la longueur de parcours, en mm
 T : le temps de propagation en ms.

5. mode opératoire [NET8]

5.1. Travaux préparatoires

Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé.

Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériau d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

5.2. Points de mesures

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

6. Manière de mesure

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

6.1. Mesure en transparence (directe)

Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

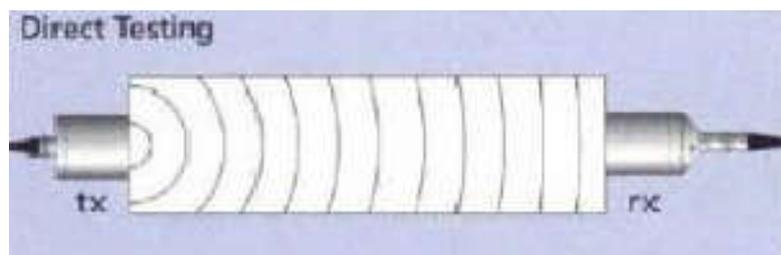


Figure 4.3: Méthode directe.

6.2. Mesures en surface (indirecte)

Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur.

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

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

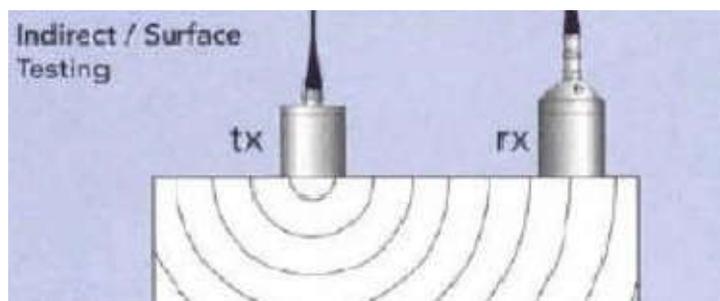


Figure 4.4 : Méthode indirecte.

Mesures semi directe6.3.

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

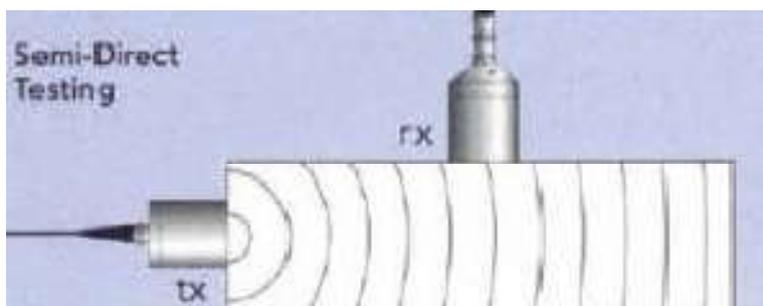


Figure 4.5: Méthode semi-directe.

7. Limites d'utilisation

Limites dimensionnelles de l'élément à ausculter (minimum 50 mm d'épaisseur avec les transducteurs du CECP). En mesure directe (transparence), limite dimensionnelle maximale de l'ordre de 2 mètres, pouvant être étendue à une dizaine de mètres avec d'autres matériels.

Il est déconseillé d'ausculter des éléments mouillés, poreux et gelés à cause de la présence de glace et d'eau dans le matériau qui en modifient les caractéristiques physiques initiales et peuvent compliquer l'exploitation.

8. Avantages

- Méthode de reconnaissance fiable, non destructive, permettant d'obtenir les caractéristiques physiques des matériaux, des profils de dégradation en profondeur, et d'établir une cartographie qualitative et quantitative du milieu ausculté.
- Méthode de surface permettant de détecter des fissures débouchantes.[NET9]

9. Inconvénients

- Expérience de l'analyse et du traitement de signal pour l'interprétation des résultats.
- Méthode fonctionnant très mal dans des bétons fortement ferrailés.
- Méthode ne permettant pas de mesurer des profondeurs de fissures.

10. Facteurs affectants la vitesse de

propagation[S.H];[Jones 1962, Bullock 1959 and Kaplan 1959]

❖ Dimension et type des granulats, granulométrie, teneur en granulats

Plusieurs chercheurs ont montré que la vitesse d'impulsion est très affectée par le type et la teneur en granulats. Jones [18] a rapporté que pour une même composition de béton et une même résistance à la compression, le béton composé avec de granulats arrondis a la plus faible vitesse de propagation, les granulats concassés par contre donnent une valeur plus élevée de la vitesse de propagation.

❖ Type de ciment

Le type de ciment n'a pas d'influence directe sur la vitesse de propagation [Jones 1954].

Le taux d'hydratation diffère d'un ciment à un autre et ceci influence la vitesse de propagation. Comme le degré d'hydratation augmente, le module d'élasticité augmente aussi, ainsi que la vitesse de propagation.

❖ **Le rapport eau/ciment**

Kaplan [Kaplan 1959] dans son travail de recherches, a démontré que lorsque le rapport E/C augmente, la résistance du béton à la compression et la valeur de la vitesse de la propagation correspondante diminue en supposant la même composition de béton.

❖ **Les adjuvants**

Les entraîneurs d'air n'ont pas vraiment une influence sur la relation entre la vitesse de propagation et la résistance à la compression du béton [Jones 1954]. D'autres adjuvants vont influencer approximativement la vitesse de propagation de la même manière que le taux d'hydratation. L'addition du chlorure de calcium par exemple réduit le temps de durcissement du béton et fait augmenter la valeur de la vitesse de propagation.

❖ **L'âge du béton**

Le phénomène est similaire à celui du développement de la résistance à la compression du béton. Jones [1954] a montré que la vitesse de propagation augmente très rapidement au début puis se stabilise. La vitesse de propagation atteint plus vite sa valeur maximale que la résistance. Il conclut que les erreurs expérimentales font qu'il est impossible d'évaluer avec précision la valeur de la résistance à la compression avec précision.

❖ **Positionnement du transducteur**

La nature du contact du transducteur par rapport à la surface de l'élément à tester a une grande influence sur la valeur des vitesses de propagation ; un contact impropre peut mener à des lectures erronées de la vitesse de propagation.

❖ **Température du béton**

Au-delà de l'intervalle des températures comprises entre 5 à 20°C ; l'influence de la température est très important [Jones et al. 1969] des rectifications doivent être faites comme cela est recommandé dans les normes BS 1881 Part 203, 1986.

❖ **L'humidité et condition de cure du béton**

La valeur de la vitesse de propagation pour un béton saturé est plus élevée que pour un béton qui durcit à l'air. Néanmoins l'influence de l'humidité est moins importante sur les bétons à hautes résistances que pour les bétons avec des résistances normales.

❖ **Distance entre les transducteurs**

Théoriquement la distance de trajet de l'onde et sa fréquence ne doivent pas le temps de propagation, donc pas d'effet sur la vitesse de propagation du fait de la nature de non-homogénéité du béton [Jones. 1962].

❖ **Niveau de contrainte**

La valeur de la vitesse de propagation n'est généralement pas affectée par le niveau de contraintes que subit l'élément à tester ; seulement quand le béton est sujet à de très grandes contraintes avec des cycles répétés, des fissures se développent ce qui va réduire la valeur de la vitesse de propagation.

❖ **Présence de barres de renfort**

L'un des facteurs les plus importants influençant la vitesse d'impulsion est la présence de barres de renfort.

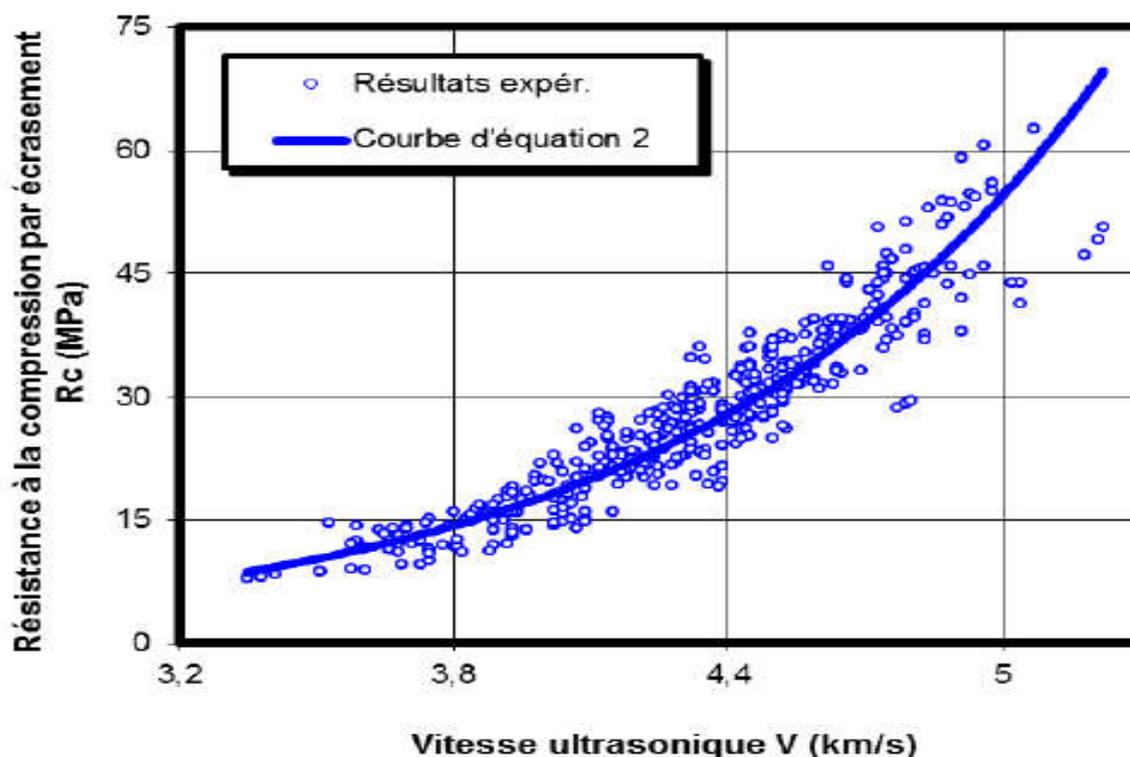
La vitesse de propagation de l'acier est 1.4 à 1.7 fois celle du plein béton. Alors il est préférable quand il est possible, d'éviter de tester à l'endroit de présence des barres de renfort.

Lorsque ceci est inévitable il faut alors corriger en affectant de facteurs de correction ; qui sont recommandés par la RILEM 23 [RILEM. 1972] et les British standards.

11. Relation entre la résistance par écrasement et par mesure ultrasonique [S.H]

Malgré qu'il n'existe pas de relation physique directe entre la résistance à la compression du béton et la vitesse ultrasonique de propagation ; la résistance peut être évaluée en établissant au préalable des courbes graphiques corrélant les deux paramètres.

La relation entre la résistance et la vitesse de propagation n'est pas unique d'autant plus qu'elle est affectée par plusieurs facteurs. L'influence de ces facteurs a été étudiée par plusieurs chercheurs [Sturup et al. 1984, Anderson et al. 1981, Kaplan 1959], tous ont conclu qu'il est vain de tenter d'établir une relation théorique entre la résistance à la compression et la vitesse de propagation sauf condition faite d'établir au préalable des corrélations pour le même type de béton que celui qui est sous investigation.



Equation 2: $R = 0,342 \exp(1,004 V)$

Figure 4.6 : exemple de relation résistance à la compression du béton vs vitesse de propagation

CHAPITRE 5

EXEMPLE REELS D'UTILISATION DE LA METHODE ULTRASONIQUE

A. LES BETONS

1. Exemple expérimentale à l'université 08 mai 1945 de Guelma[NET10];[B.A]

1.1. Caractéristiques des matériaux

Le choix des matériaux utilisés dans la confection des bétons s'est porté, sur leur disponibilité dans la régions de Guelma : sable de mer, deux types de graviers d'origine calcaire issus de la carrière de bendjerah (SARL SAPAM) de fraction (G 15/5 et (G 15/25), un ciment CEM II-A 42.5 de la cimenterie de Hadjar Essoud (Skikda) et enfin l'eau du robinet disponible au laboratoire (LGCH) Guelma.

Le sable est très propre (ESV > 80 %, ESP > 80 %) mais il a une majorité d'éléments fins et très fins ($M_f < 1.8$). Les graviers présentent des masses absolues proches (2.8 g/cm^3) et des impuretés inférieures à 5% (graviers propres). Ils ont des coefficients de Los Angeles de 27% et 32% respectivement pour les graviers 5/15 et 15/25. Donc les deux graviers sont utilisables pour le béton hydraulique.

1.2. Méthodologie expérimentale

La méthodologie suivie se compose des étapes suivantes :

1^{er} étape : Corps d'épreuve

Les dimensions des poutrelles sont $0.10 \times 0.12 \times 1 \text{ m}^3$ pour les éprouvettes réparées par les matériaux composites et $0.10 \times 0.10 \times 1 \text{ m}^3$ pour celles avec du béton. Trois éprouvettes pour chaque cas



Figure 5.1 : Corps d'épreuve

2^{ème} étape : préparation des supports

- on partage chaque éprouvette en deux parties pour obtenir une bonne adhésion et une mauvaise du matériau de renforcement. Le support de la première partie est nettoyé pour être propre et sain. Il est exempt de laitance, de parties non adhérentes, de toute trace de graisse, d'huile, de rouille, etc.
- On provoque des rainures transversales d'une profondeur de 2 à 3 mm pour une bonne adhérence de surface.
- L'autre moitié n'a subi aucun traitement. Elle est notamment lisse.

3^{ème} étape : préparation du mélange de la colle.

4^{ème} étape : réparation des éprouvettes.

5^{ème} étape : essais non destructifs par les ultrasons.

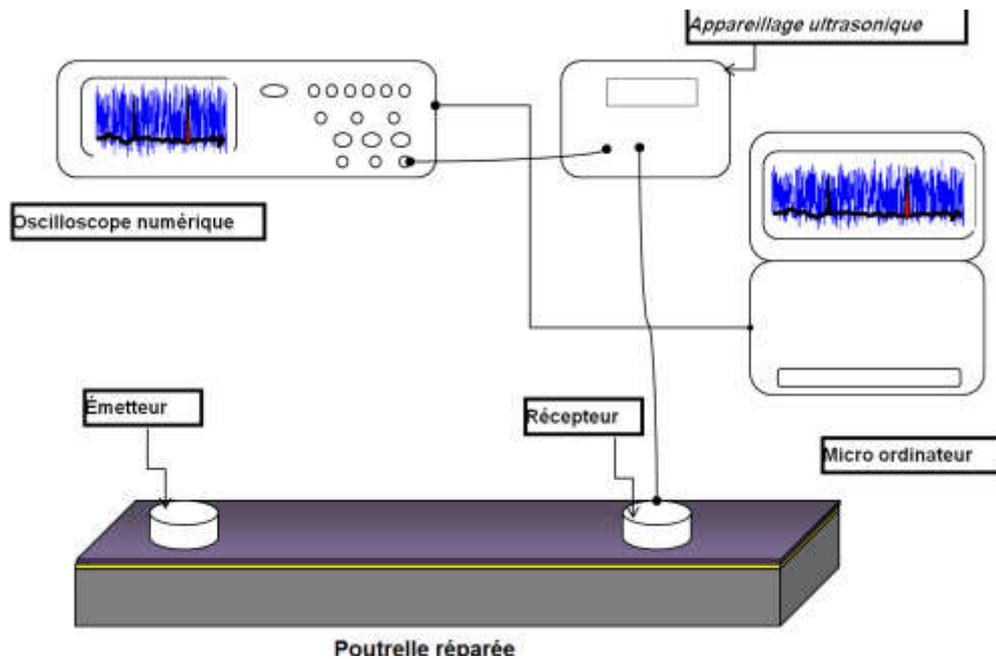


Figure 5.2: Schéma de l'opération des essais ultrasoniques.



Figure 5.3: Photo de l'opération des essais ultrasoniques.

1.3. Mesure de la vitesse ultrasonore de l'onde de surface et détection des signaux par l'oscilloscope

Les essais non destructifs par les ultrasons ont été conduits pour différents pas entre l'émetteur et le récepteur. Ces espacements sont conformes à la règle proposée par Tokimatsu et al [59], qui recommandent un espacement L supérieur à quatre fois la longueur d'onde : $\lambda / 4 \leq L$. Notre béton est un béton ordinaire ($V=3000$ m/s), la fréquence des pulsations utilisées est $f=54$ kHz ; ce qui conduit à une longueur d'onde $\lambda=5.5$ cm. On a utilisé des pas de 10, 13 et 15 cm, les transducteurs utilisés ont un diamètre de 4.95 cm, pour prospecter l'effet des espacements entre l'émetteur et le récepteur tout en respectant la règle de Tokimatsu.

1.3.1. Éprouvettes témoins

- ✓ Eprouvette témoin T1

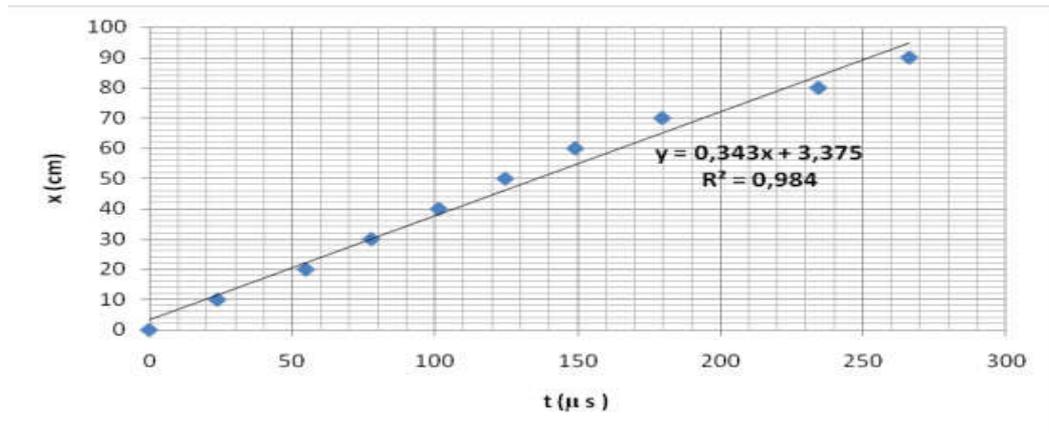


Figure 5.4: Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (10 cm).

- La vitesse des ondes de surface est estimée à partir de la pente de la courbe linéaire présentée sur la **Figure 5.4** qui donne la variation du temps (acquisition du signal) en fonction de la distance (entre l'émetteur et le récepteur) : $V_{1-10} = 0,343 \text{ cm}/\mu\text{S}$.

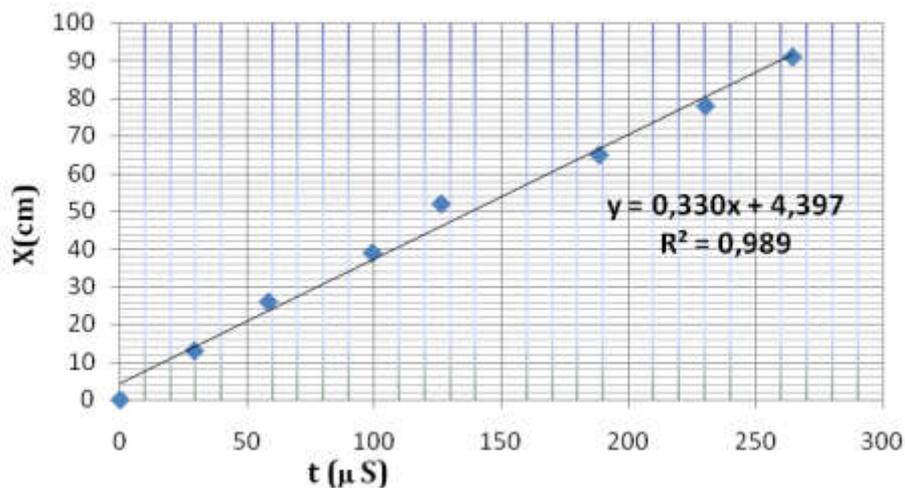


Figure 5.5: Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (13 cm).

- La vitesse des ondes de surface est $V_{1-13} = 0,330 \text{ cm}/\mu\text{S}$.

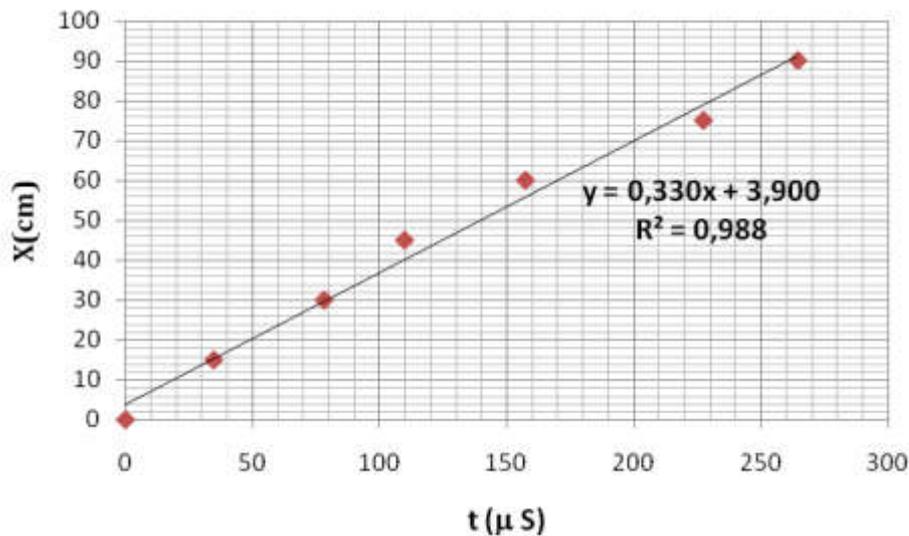


Figure 5.6: Estimation de la vitesse des ondes de surface sur l'éprouvette témoin T1 à pas constant (15 cm).

- La vitesse des ondes de surface est $V_{1-15} = 0.330 \text{ cm}/\mu\text{s}$.

Les résultats des différentes vitesses sur les trois poutres témoins sont résumés dans le tableau suivant:

Eprouvette	V [$\text{cm}/\mu\text{s}$] R^2			Vmoy. [$\text{cm}/\mu\text{s}$]
	T1	T2	T3	
Pas de mesure (cm)				
10	0.343 $R^2=0.984$	0.343 $R^2=0.987$	0.322 $R^2=0.970$	0.336± 0.012
13	0.330 $R^2=0.989$	0.342 $R^2=0.996$	0.357 $R^2=0.977$	0.343±0.014
15	0.330 $R^2=0.988$	0.339 $R^2=0.993$	0.411 $R^2=0.998$	0.360±0.044

Tableau 5.1: Vitesses des ultrasons des éprouvettes témoins.

- Les vitesses obtenues pour les différentes poutres indiquent que la qualité du béton est acceptable et confirment les résultats d'écrasement pour déterminer la résistance.

L'éprouvette T3 présente, pour le pas de mesure de 15 cm, une valeur de vitesse supérieure aux autres éprouvettes ce qui a conduit à un écart dépassant les 10% de la moyenne

desmesures pour ce pas. On remarque que l'effet du pas de mesure (pour les pas retenus) estnégligeable (7 % avec prise en compte de la valeur de T3).

2. L'utilisation de la Technique Ultrasonique dans le cas de Béton Recyclé_[S.S] _[H.H]; _[A.S]

2.1. Les résultats d'essai non destructif

Le tableau 5.2 présente la mesure de temps de propagation du son dans deux faces des 33 éprouvettes cubiques (10*10*10) cm³. A partir de temps mesuré on a calculé la vitesse de son pour chaque éprouvette. Le tableau suivant présente les résultats

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

Tableau 5.2 : Calcul de la vitesse de son de dosage 350 Kg/m³.

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

Tableau 5.3 : Calcul de la vitesse de son de dosage 400 Kg/m³.**Identification:**

V₁ Et V₂ : la vitesse de son

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

3.Essais sont réalisés au niveau du laboratoire des travaux publics du sud LTPS_[B.A] [D.I]

3.1. Les caractéristiques des constituants :

Les différents constituants (matériaux) rentrant dans cette étude, pour chaque formulation présentés dans les tableaux suivants:

Formulation N° 01:

Matériaux	Nature	Provenance
Ciment	CPJ-CEMII/B classe 42,5.	M'sila
Sable	Sable d'oued	HAMDA LAGHOUAT
Gravier 3/8	concassé	station de concassage ZELFANA
Gravier 8/15		
Gravier 15/25		

Tableau 5.4 : nature des matériaux utilisés et leurs provenances pour la formulation N°01.

Formulation N° 02:

Matériaux	Nature	Provenance
Ciment	CRS Mokaouem classe 42,5.	cimenterie lafarge
Sable	concassé	station de concassage BERRIANE
Gravier 3/8	concassé	station de concassage BERRIANE
Gravier 8/15		
Gravier 15/25		

Tableau 5.5 : nature des matériaux utilisés et leurs provenances pour la formulation N°02.

Formulation N° 03:

Matériaux	Nature	Provenance
Ciment	CPJ-CEMII/B classe 42,5.	M'sila
Sable	Sable d'oued	Zelfana
Gravier 3/8	concassé	station de concassage METLILI
Gravier 8/15		

Tableau 5.6 : nature des matériaux utilisés et leurs provenances pour la formulation N°03.

Remarque : les trois formulations sont réalisés avec un dosage du ciment 350 kg/m³ pour avoir une résistance de compression $F_{c28} = 25$ MPa.

formulation	Age (jours)	Essai ultrason		
		Epaisseur (cm)	Vitesse (m / s)	Résistance (MPa)
N° 01	14	30	4120	26.8
	28	30	4240	29.7
	56	30	4260	30.1
N° 02	14	30	4180	27.5
	28	30	4230	29.4

	56	30	4320	31.3
N° 03	14	30	4260	30.1
	28	30	4290	30.6
	56	30	4310	31.2

Tableau 5.7 : Résultats des essais aux ultrasons pour les trois formulations.

B.LES MORTIERS

Exemple 1:Exemple expérimentale à l'université de Tizi Ouzou sur un mortier à l'âge de 28 jours.

1. Les constituants du mortier utilisé

Dans notre étude nous avons utilisé des matériaux naturels locaux et ceux issus du recyclage, soit les fines de mortier de démolition "FMD".

1. Ciment

Pour la fabrication des éprouvettes et l'étude de la rhéologie nous avons utilisé un ciment Portland composé (CPJ CEM II/B 42.5N NA442), ciment Lafarge MATINE, ciment pour béton exigeant. La composition minéralogique du Clinker, selon la formule de Bogue, est : le C3S à 60±3%, le C3A à 7.5±1%.

2. Sable

Parce que l'étude se fait sur mortiers, nous n'avons donc travaillé qu'avec du sable. Ce sable est concassé, sable de carrière, il possède une étendue granulométrique allant de 0 à 3mm.

3. Fines de mortier de démolition

Fines de granulats de démolition, issues du recyclage de mortier de démolition. Le diamètre fixé pour l'utilisation de ces fines comme substituant au ciment est le 0,8 mm.

4. Adjuvant

Pour la rhéologie des mortiers nous avons utilisé un Super plastifiant/Haut Réducteur d'eau polyvalent pour bétons prêts à l'emploi «SIKA VISCOCRETE TEMPO 12 ».

Le super plastifiant "TEMPO 12" est un liquide brun clair, de pH égal à $5,5 \pm 1,0$ et de densité de $1,060 \pm 0,020$, spécialement formulé pour réduire la quantité d'eau de gâchage. Il est incorporé préalablement à l'eau de gâchage, en ce qui concerne le dosage nous avons respecté la fiche technique de SIKA, dont la plage de dosage est de : 0,1 à 5,0% du poids du liant ou du ciment selon la fluidité et les performances recherchées.

❖ **SIKA VISCOCRETE TEMPO 12** : est un super plastifiant puissant qui confère aux bétons les propriétés suivantes:

- Longue rhéologie
- Robustesse à la ségrégation,
- Qualité de parement

4. Eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau potable du robinet.

2. Formulation des mortiers

Après avoir définis les proportions du mortier de référence "MR", nous avons déterminé les compositions des autres mortiers M5, M10, M15, M20, M25, M30, M35. Ces derniers sont obtenus en maintenant toutes les proportions identiques au mortier de référence (en eau et en sable), la seule modification est la proportion en ciment qui sera substitué au fur et à mesure par les fines de mortiers de démolition FMD.

L'étude de la substitution du ciment par les fines FMD a été réalisée sur des éprouvettes prismatiques 7 cm × 7 cm × 28cm (Figure 5.7).

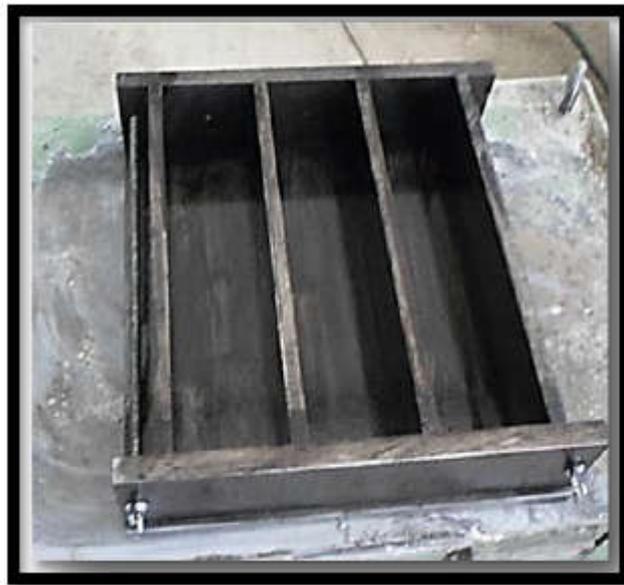


Figure 5.7: Moule de confection des éprouvettes 7×7×28 cm

❖ Nomenclature des mortiers étudiés

Sept compositions de mortiers ont été préparées en maintenant constant le volume de pâte à 1372 cm³ à raison de sept taux de substitution volumique (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%). La nomenclature des mortiers testés est donnée dans le **tableau 5.8** suivant.

	MR	M5	M10	M15	M20	M25	M30	M35
% CIMENT	100	95	90	85	80	75	70	65
%FMD	0	5	10	15	20	25	30	35

Tableau 5.8:Nomenclature des compositions de mortiers testés

❖ Toutes les compositions étudiées sont présentées dans le **Tableau 5.8**.

Pour remplir les trois compartiments du moule nous avons préparé des gâchées de près de 5 litres. Les quantités des différentes gâchées sont données dans le tableau suivant :

Mortiers	Sable (g)	Ciment (g)	Fines(g)	Eau (g)	E/C	E/L
MR	6750	2250	0	1125	0.500	0.5
M5	6750	2137.5	112.5	1125	0.520	0.5
M10	6750	2025	225	1125	0.550	0.5
M15	6750	1912.5	337.5	1125	0.580	0.5
M20	6750	1800	450	1125	0.625	0.5
M25	6750	1687.5	562.5	1125	0.660	0.5
M30	6750	1575	675	1125	0.710	0.5
M35	6750	1562.5	1462.5	1125	0.720	0.5

Tableau 5.9:Compositions des mortiers en gramme.

L : Liant (C + Fines de béton)



Figure 5.8: Gachée du mortier.



Figure 5.9: Mortier après arasement.



Figure 5.10: Mortiers $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$.

3. Vérification de la résistance par l'essai ultrasonique

Dans notre cas, nous avons utilisé la disposition directe car cela permet une transmission maximale du signal entre les transducteurs. Nous avons placé les transducteurs (émetteur et récepteur) sur deux faces opposées, au même niveau. La longueur de trajet est la distance entre le centre des deux faces opposées, dans notre cas elle correspond à la longueur de l'éprouvette qui est de 280mm.



Figure 5.11: Position des transducteurs

4. Résultats des essais d'auscultation sonore (ultra-son)

Au 28^{ème} jour, après être pesées, les éprouvettes prismatiques sont testées à l'ultrason. Les éprouvettes sont donc humides. Les vitesses des ultrasons ont été déterminées par mesure du temps de parcours sur une série de trois éprouvettes pour chaque mortier utilisé.

Pour une meilleure précision, nous avons répété l'essai trois fois sur chaque éprouvette, et nous avons par la suite calculé la moyenne des trois mesures obtenues sur chaque éprouvette de mortier. Les moyennes ainsi obtenues sont récapitulées dans le **tableau 5.10** suivant :

Mortiers	V1	V2	V3	Moyenne	% de baisse des Vitesses
MR	4568	4583	4595	4582	
M5	4534	4502	4540	4525	1%
M20	4468	4438	4424	4443	3%
M25	4341	4325	4364	4343	5%
M30	4297	4230	4288	4272	7%
M35	4213	4140	4209	4187	9%

Tableau 5.10: Vitesses à l'ultra-son (m/s) obtenues à 28 jours

Il est à noter que pour les mortiers M10 et M 15, on a eu un problème de réglage, et les résultats sont donc écartés.

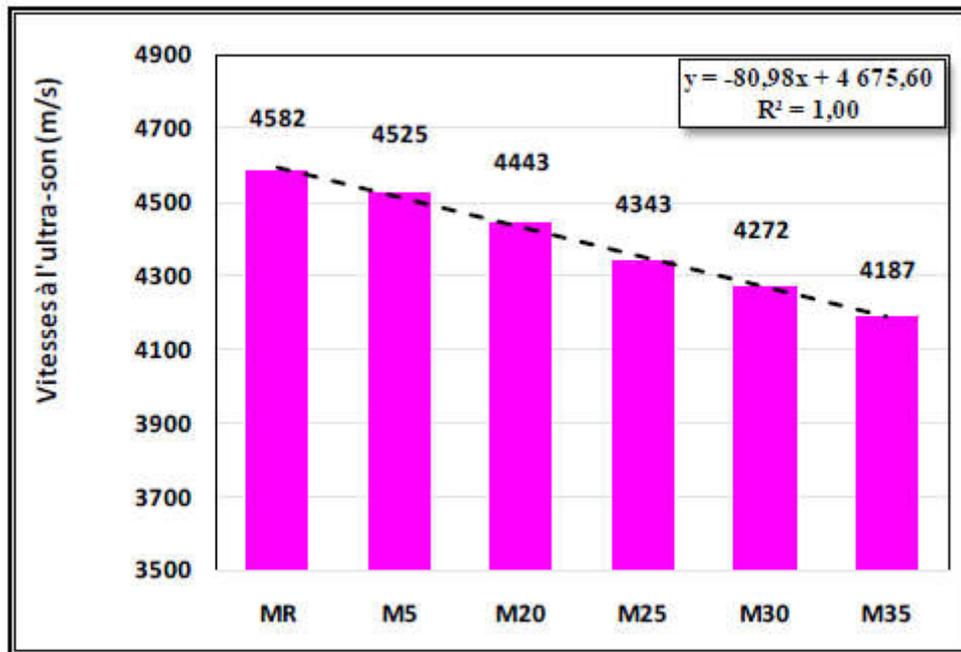


Figure 5.12: Vitesses à l'ultra-son à 28 jours des mortiers testés

Les résultats de la figure montrent que les vitesses à l'ultrason pour ces mortiers baissent avec l'augmentation du % de FMD dans les mortiers. Plus il y a de FMD moins les ondes vont vite. Ainsi, la vitesse passe de 4582 m/s pour le mortier à 100% de ciment et 0 % de FMD à 4187 m/s pour le mortier à 65 % de ciment et 35 % de FMD.

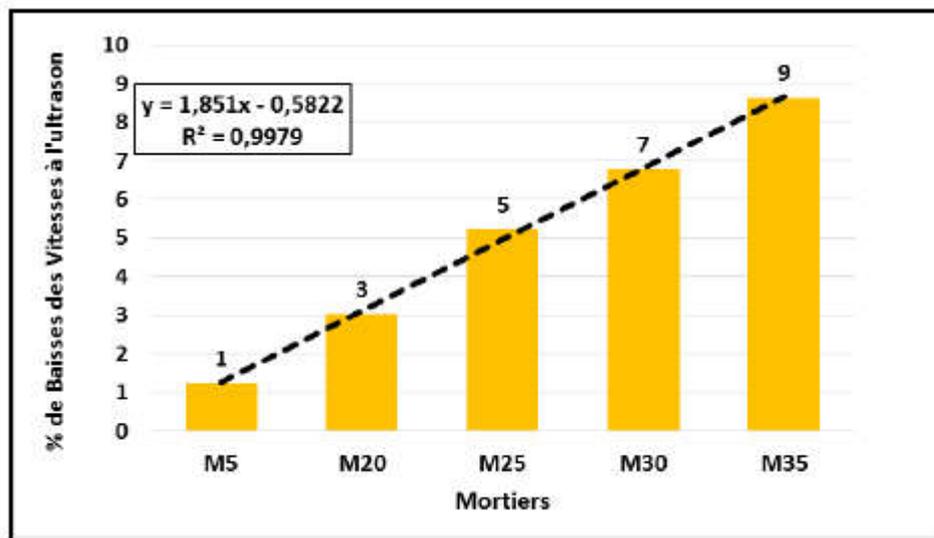


Figure 5.13: % de baisses des vitesses à 28 jours des mortiers testés

CONCLUSION GENERALE

A la fin de cette étude, on peut conclure qu'il y a plusieurs méthodes pour contrôler les bétons et les mortiers soit par les méthodes destructives qu'on utilise généralement sur des éprouvettes et à l'aide de quelques formules on peut calculer les résistances; soit par les méthodes non destructives qu'on utilise sur des éprouvettes et même sur des ouvrages et chacun de ces essais a son utilisation.

A travers cette étude nous avons enrichi nos connaissances sur les domaines d'utilisation des essais non destructifs et particulièrement l'essai d'auscultation dynamique.

NETGRAPHIE

[NET1] <https://www.futura-sciences.com/maison/definitions/batiment-beton-5834/>

[NET2] <https://www.infociments.fr/glossaire/beton>

[NET 3] <http://www.planete-tp.com/proprietes-des-betons-durcis-a671.html>

[NET4] [http://public.iutenligne.net/genie-civil/beton-
arme/hivin/beton_arme/documents/Cours_BA_ST2_chap_2.pdf](http://public.iutenligne.net/genie-civil/beton-
arme/hivin/beton_arme/documents/Cours_BA_ST2_chap_2.pdf)

[NET5] <https://eduscol.education.fr/>

[NET6] file:///C:/Users/s-inf/Downloads/Djebali_Mattech99327-3382011.

[NET7] https://www.memoireonline.com/01/09/1871/m_Fissuration-en-beton-avec-referenc-particuliere-au-beton--haute-performance7.html

[NET8] <http://thesis.univ-biskra.dz/1328/5/partieI%20chapitre%2003.pdf>

[NET9] FicheB1-2-Guide_Auscultation_Ouvrage_Art-Cahier_Interactif_Ifsttar.

[NET10] univ-guelma.dz/recherche/PNR%20BILANs/benouis%20abdelhalim

Références bibliographiques

[A.B][R.I][B.W]AYACHE Brahim; RAHAL Ilyes; BENMANSOUR Walid «CARACTERISATION DES DIFFERENTS TYPES DEBETON A BASE DE COPEAUX DE BOIS (Béton Ordinaire – Béton Autoplaçants – Béton A Haute Performance)»Université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2019.

[S.S][H.H] SRAIDI SAMIRA ; HARID HANA « Contrôle de la qualité du béton par des essais non destructifs» université 08 Mai 1945 de Guelma, Juin 2016.

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

[B.A.B]«TRAITEMENT NATUREL DES MORTIERS ET BETONS DESTINES AUX STRUCTURES EN BETON PREFABRIQUE» UNIVERSITE MOHAMMED KHEIDER - BISKRA –,2006.

[B.A] [D.I] Badji Abdelhakim ; Daouadi Idriss « Corrélation entre les essais destructifs et les essais non destructifs par les matériaux locaux de la région de Ghardaïa» Université de Ghardaïa, 10/2020.

[B.N] [Z.A] BELMOKHTAR NASSIMA ZERAIG AKILA« Effet du mode d'introduction de la nano-silice sur les propriétés rhéologiques et physicomécaniques des pâtes cimentaires et mortiers de ciment»Université M'Hamed Bougera de Boumerdes;2017.

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

[B.R] [M.Y]Bechir Redjel; Mourad Yahiaoui«La mesure de la résistance du béton a la traction» institue de génie civil université de Annaba.

[A.R] ALI RAID «CONTRÔLE NON DESTRUCTIF RESSUAGE, MAGNÉTOSCOPIE, RADIOGRAPHIE, COURANTS DE FOUCAULT ET ULTRASON» 2017-2018

[B.M] Benmalek ML ; cours de MDC2 chapitre1 : les bétons. Licence génie civil, université 08 mai 1945 Guelma ,2020.

[T.K] **TALEB KARINA** « Etude à l'état frais et à l'état durci de l'influence des Fines de Mortiers de Démolition sur les propriétés des Mortiers», Université mouloud Mammeri Tizi Ouzou 2015/2016.

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

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

[X.J] [H.H] [F.S] **Xavier Jourdain, Hélène Horsin, Francois Soleilhet** «Essais destructifs sur éprouvettes en béton et acier d'armature» école normale supérieure Paris Saclay 2018.

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

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

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

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

[De Larrard 2000] : De Larrard F. « Structures granulaires et formulations des bétons. LCPC, 2000.

[Dreux et Fiesta. 1998] : Dreux et fiesta. « Nouveau guide du béton et de ses constituants » ed. Eyrolles, 1998.

[Jones 1954]: Jones R., «Testing of concrete by an ultrasonic pulse technique», RILEM int. symp. On non-destructive testing of materials and structures, Paris, vol. 1, paper n° A17, janvier 1954.

[Jones 1962]: Jones R., «Non-destructive testing of concrete», Cambridge university press, London, 1962.

[Jones et al 1969]: Jones R, Facaoaru I., «Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method», Materials and structures, res. testing (Paris) 2 (19), 275, 1969.

[Kaplan 1959]: Kaplan M F., «The effect of age and water to cement ratio upon the relation between ultrasonic pulse velocity and compressive strength of concrete», mag. Concrete, res., 11(32), 85, 1959.

[RILEM 1972]: RILEM recommendations NDT, testing of concrete by the ultrasonic pulse method, Paris, 1972.

[Sturup et al 1984]: Sturup V R, Vecchio R J, Caratin H., «Pulse velocity as a measure of concrete compressive strength», ACI SP 82-11, American concrete institute, Farmington hills, MI, 1984.

[Anderson et al 1981]: Anderson D A, Seals R K., «Pulse velocity as predictor of 28 days strength, ACI J., 78, 116, 1981.

Sergei Y. Solokov., « On the problem of propagation of ultrasonore oxillations in various bodies», ELCK. Nach. Tech...454-460, 1929.

[Baron et Sauterey 1982] : Baron et Sauterey. Le béton hydraulique, Paris, presses ENPC, 1982.

[Gaussorgues 1999] : Gaussorgues G., «La thermographie infrarouge ; principes - techniques - applications», quatrième édition revue et argumentée, ISBN° 2-7430-0290-5, technique et documentation, Lavoisier (Paris), 1999.