

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux en génie civil

Présenté par :

- *Ghadjetti Nadjet.*

- *Yaghla Ahlem .*

---

---

***Thème : Contrôle de la qualité du béton produit  
localement***

---

---

Sous la direction de : *Mme. KHALDI Nacera.*

**Septembre 2020**

---

## *Remerciements*

*Un grand gratitude à notre encadreur KHALDI Nacera .*

*Qui nous a soutenues pendant toutes les étapes de mémoire en manifestant un grand intérêt pour notre travail.*

*Nos remerciements iront également aux membres du jury*

*Pour avoir accepté d'évaluer notre travail de recherche.*

*A tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin, par un geste, une parole ou un conseil, on leur dis merci.*

*Sans oublier tous nos enseignants qui nous ont assurés des*

*Etudes de haut niveau et qui nous permis d'acquérir des connaissances*

## **Dédicace**

*Je dédie cet événement marquant de ma vie à la mémoire de mes parents disparu. J'espère qu'ils sont dans un monde meilleur que le notre, et qu'ils apprécient ce humble travail et je leur dédie ce geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour eux et pour leurs âmes. Puisse Dieu, le tout puissant, les avoir en sa sainte miséricorde !*

*Ma Très chère binôme « Nadjet Ghadjetti » et à toute sa famille*

*A mes chers soeurs ; Salîha . Yasmina, Nemcha*

*A mes chers frères ; Rbiai, Saleh, Morad*

*A mon très cher fiancé ; Mohamed*

*A toutes mes amies ;*

*Wisem, Afafe, Iness, Nada, Khawla, Nadjet, Bouchra, Amira*

***A tous les membres de ma famille, petits et grands, tous ceux qui me connaissent et m'aiment***

*Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.*

*Qu'Allah vous protège et réalise vos rêves en témoignage de mes reconnaissances éternelles pour votre encouragement et votre dévouement constant*

*Ahlem*

## **Dédicace**

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tous simplement que : Je dédie ce mémoire de master à :*

*A Ma tendre Mère Zohra: Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*A Mon très cher Père Mouloud : Aucune dédicace ne saurait exprimer L'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

*Ma Très chère binôme « Yaghla Ahlem » et à toute sa famille*

*A mes sœurs :Houda , Fadila Meriem, Aicha Chafia et Aya*

*A mes beau frère :Amar , Khaled, Omar et Ahmed*

*A mes très chère amis : Sameh , Zahra , Khawla :*

*A tous les membres de ma promotion.*

*A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.*

*A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.*

*Nadjet*

## Résumé

Le béton est l'un des matériaux les plus utilisés depuis long temps et dans toute la vie et presque dans tous les domaines. La construction d'un élément en béton ou en béton armé se compose d'une succession d'étapes dont aucune ne doit être négligée. Après la conception de la forme et des détails et le dimensionnement de la section et des armatures, intervient le choix définitif des matériaux nécessaires (type de béton et d'aciers), les critères déterminant étant la résistance (état de ruine), la déformabilité (état de service), la durabilité (protection des armatures) et la mise en place (réseau d'armatures et ouvrabilité du béton). Suivant les spécifications, les composants du béton peuvent être choisis pour optimiser les performances selon l'un ou l'autre de ces critères parfois contradictoires. Le contrôle de la qualité lors du bétonnage et un traitement de cure approprié (protection du béton contre la dessiccation et les hautes ou basses températures pendant le durcissement) sont deux éléments primordiaux.

Finalement, une fois l'élément réalisé, l'ingénieur devra encore s'assurer { partir des essais sur le béton durci et de l'inspection sur place que les hypothèses du calcul statique (qualité des matériaux, détails constructifs) sont conformes à la réalité. Les essais de résistance mécanique et de déformabilité (compression, traction, flexion, module, fluage), destructifs ou non-destructifs, permettent de juger les performances du béton durci.

Dans le cadre de contrôles d'ouvrages neufs ou en construction, comme de diagnostics d'état d'ouvrages anciens, il est important de mettre en œuvre des techniques performantes et adaptées à ce contrôle.

Dans notre étude nous avons essayé de comprendre les différentes méthodes utilisées pour le contrôle de la qualité du béton produit localement.

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

## **Abstract :**

Concrete has been one of the most used materials for a long time and in all life and in almost all fields. The construction of a concrete or reinforced concrete element consists of a succession of stages none of which should be neglected .after the dimensioning of the section and the reinforcement ,the final choice of the necessary materials (type of concrete and steels) intervencs,the determining criteria being the resistance being the resistance (state of ruin), durability (protection of reinforcement )

And installation (network of reinforcement and workability of concrete ).depending on the specifications,the concrete components can be chosen to optimize performance according to one or the other of these sometimes contradictory criteria quality control during concreting and an appropriate curing treatment (protection of the concrete against desiccation and high or low temperatures during curing) are two essential elements .

Finally, once the element has been completed, the engineer must again ensure from the tests on the hardened concrete and the onsite inspection that the assumptions of the static calculation (quality of materials ,construction details) comply with the specification .reality mechanical strength and deformability tests(compression ,traction,bending,modulus,creep),destructive or non destructive ,allow the performance of hardened concrete to be judged

In the context of inspections of new or under construction works,as well as diagnostics of the condition of old works,it is important to implement efficient technique adapted to this control

In our study we tried to understand the different methods used quality control of locally produced concrete

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

## ملخص

لقد كانت الخرسانة من أكثر المواد استخداما لفترة طويلة وفي جميع المجالات تقريبا. يتكون بناء عنصر خرساني او خرساني مسلح من سلسلة من المراحل، لا ينبغي اهمال أي منها. بعد تصميم الشكل والتفاصيل وابعاد القسم و التعزيزات، يتدخل الاختبار النهائي للمواد الضرورية ( نوع الخرسانة وال فولاد ) ، والمعايير المحددة هي المقاومة (حالة الخراب ) ، والتشوه (قابلية الخدمة) والتمانة (حماية التعزيزات) والتركييب (شبكة التعزيزات وقابلية تشغيل الخرسانة). اعتمادا على المواصفات، يمكن اختيار مكونات الخرسانة لتحسين الاداء وفقا لوحد او اكثر من هذه المعايير المتناقضة احيانا. تعتبر مراقبة الجودة اثناء صب الخرسانة ومعالجة المعالجة المناسبة) حماية الخرسانة من الجفاف ودرجات الحرارة المرتفعة او المنخفضة اثناء المعالجة (

اخيرا، بمجرد اكتمال العنصر، يجب على المهندس مرة اخرى التاكيد من الاختبارات على الخرسانة المتصلدة والتفتيش في الموقع ان افتراضات الحساب الثابت (جودة المواد و تفاصيل البناء) تتوافق مع المواصفات. واقع اختبارات القوة الميكانيكية وقابلية التشوه (الضغط الجبر الانحناء المعامل الزحف) المدمرة او غير المدمرة تسمح بالحكم على اداء الخرسانة المتصلدة. في سياق عمليات التفتيش على الاعمال الجديدة او قيد الانشاء، وكذلك تشخيص حالة الاعمال القديمة من المهم تنفيذ تقنيات فعالة تتكيف مع هذا التحكم.

حاولنا في دراستنا فهم الطرق المختلفة المستخدمة لمراقبة جودة الخرسانة المنتجة محليا.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة، الترابط، الاختبارات التدميرية وغير الاتلافية، التحكم.

## *Sommaire*

Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste d'abréviation	

### *Présentation et objectif de l'étude*

Introduction.....	1.
Objectif.....	1
Présentation de l'étude.....	2

### *Chapitre I : Notions générales*

I.	Béton.....	3
1.1.	définition du béton.....	3
1.2.	Résistance caractéristique du béton.....	3
1.2.1.	Résistance en compression.....	3
•	Relation entre la résistance et le module élastique.....	3
➤	Déformations instantanées ( $E_{ij}$ ).....	3
➤	Déformations différées ( $E_{vj}$ ).....	4
•	Paramètres influant la résistance.....	4
1.2.2.	Résistance à la traction.....	4
1.3	Propriétés du béton.....	4



1.3.1	Béton frais.....	5
1.3.2	Béton durci.....	6
2	Le contrôle non destructif (CND).....	6
2.1	Historique.....	7
2.2	Domaines d'utilisation.....	7
2.3	Différentes méthodes de contrôles.....	8
3	Le contrôle destructif.....	10
3.1	Limite des méthodes destructives.....	10

### ***Chapitre II : Les Méthodes de contrôle du béton***

II.A	Contrôles par les méthodes non destructives.....	11
1	Scléromètre.....	11
1.1	Objectif de l'essai.....	11
1.2	Principe de l'essai.....	11
1.3	Appareillage.....	12
1.4	Mode Opérateur.....	12
1.4.1	Préparation de la surface.....	12
1.4.2	Points de mesures.....	12
1.5	Méthodes de mesure de l'Indice de rebondissement.....	13
1.6	Inconvénients de la méthode sclérométrique.....	13
1.7	Références normatives.....	14
1.8	Les avantages de la méthode sclérométrique.....	14
2	Méthode ultrasonique .....	14
2.1	Objectif.....	14
2.2	Principe.....	14
2.3	Mode Opérateur.....	16
2.3.1	Travaux préparatoires.....	16
2.3.2	Points de mesures.....	16
2.4	Distances minimales entre points de mesures.....	16
2.5	Étalonnage de l'appareil.....	16
2.6	Manières de mesure.....	16
2.6.1	Mesure en transparence (directe).....	16

2.6.2	Mesures en surface (indirecte).....	17
2.6.3	Mesures semi directe.....	17
2.7	Interprétation des résultats de mesure aux ultrasons.....	17
2.7.1	Paramètres influant la vitesse des ultrasons.....	18
2.7.2	Autres interprétations possibles.....	18
2.8	Références normatives.....	19
2.9	Les avantages.....	19
3	La Maturométrie.....	19
3.1	Fondements de la méthode.....	19
3.2	Méthode d'essai .....	20
3.3	Chaîne de mesure.....	20
3.4	Avantages de la maturométrie.....	21
4	Contrôle radiographique.....	21
4.1	Principes fondamentaux.....	22
4.2	Equipements de la méthode d'essai radiographique.....	23
4.3	Applications et limites.....	23
5	Thermographie infrarouge.....	24
5.1	Principes fondamentaux.....	24
5.2	Equipements utilisés dans la thermographie infrarouge.....	26
6.	Le Géo radar.....	26
6.1	Le matériel.....	26
6.2	Application aux bâtiments et ouvrages d'art.....	27
7	Impact-écho.....	27
7.1	Principe de base.....	27
7.2	Analyse des données.....	28
7.3	Le temps de contact.....	28
8	Acoustique non linéaire : le saut temporel.....	29
II.B	Contrôles par les méthodes destructives.....	30
1	Essai de traction par fendage.....	30
1.1	Objet de la norme .....	30
1.2	Eprouvettes.....	30
1.3	Machine d'essai.....	31
1.4	Bandes de chargement.....	31

1.5.	Opérations préparatoires.....	31
1.5.1	Précautions contre la dessiccation.....	31
1.5.2	Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de sa masse volumique.....	31
1.5.3	Choix des génératrices de chargement.....	32
1.6	Conduite de l'essai.....	32
1.6.1	Mise en place et centrage de l'éprouvette.....	32
1.6.2	Mise en charge.....	32
1.6.3	Expression des résultats.....	32
2	Essai de traction directe.....	33
2.1	Objet de la norme.....	33
2.2	Eprouvettes.....	33
2.3	Machine d'essai.....	33
2.4	Dispositifs de traction.....	33
2.5	Opérations préparatoires.....	33
2.5.1	Précautions contre la dessiccation.....	33
2.5.2	Sciage des extrémités de l'éprouvette.....	35
2.5.3	Contrôle des faces de chargement.....	35
2.5.4	Détermination de la masse volumique.....	35
2.5.5	Collage des faces de chargement aux plaques de traction.....	35
2.5.6	Conduite de l'essai.....	35
3	Essais de traction par flexion.....	36
3.1	Objet de la norme.....	36
3.2	Résistance à la traction par flexion.....	36
3.3	Eprouvette.....	37
3.4	Machine d'essai.....	37
3.5	Appareil de chargement.....	37
3.6	Opérations préparatoires.....	38
3.6.1	Précautions contre la dessiccation.....	38
3.6.2	Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de sa masse volumique.....	38
3.6.3	Contrôle des tolérances de formes de l'éprouvette.....	39
3.6.4	Conduite de l'essai.....	39

3.6 .5	Expression des résultats.....	39
4	Essais de compression.....	39
4.1	Objet de la norme.....	39
4.2	Définition de la résistance à la compression.....	39
4.3	Eprouvettes .....	
4.4		40
4.5	Machine d'essai.....	40
4.5.1	Opérations préparatoires.....	40
4.5.2	Précautions contre la dessiccation.....	40
	Détermination de la masse de l'éprouvette et éventuellement de la masse	
4.5.3	volumique.....	41
4.5.4	Surfaçage des extrémités.....	42
4.5.5	Conduite de l'essai.....	42
	Expression des résultats.....	43

**Chapitre III :**  
***Description du Laboratoire Nationale de l'Habitat et de la Construction***

III .1		
III .2	Historique et définition.....	44
III .3	<i>Domaine d'activités et compétences</i> .....	44
III .4	Organisation Générale.....	50
III .5	Le chemin de la qualité.....	51
III .6	SYSTEME QUALITE ORGANISATION.....	52
III .6.1	Les essais réalisés dans LNHC.....	53
III .6.1.1	Les essais sur matériaux et béton.....	53
III .6.1.1.a	Les essais sur matériaux.....	53
III .6.1.1.b	Essai d'équivalent de sable.....	53
III .6.1.1.c	La densité des granulats.....	54
III .6.1.2	Analyse granulométrique par tamisage.....	55
III .6.1.2.1	Les Les essais sur béton.....	57
III .6.1.2.1.A	Béton à l'état frais.....	57
III .6.1 .2.2	L'affaissement.....	57
1)	Béton à l'état durci.....	59

1.1)	Essai destructif.....	59
2)	Essai de compression.....	59
2.1)	Essais non descriptifs.....	60
2.2)	Essai ultrasonique.....	60
III .6.1. 3	Essai au Scléromètre.....	61
III .6.1.3.1	Les essais géotechniques.....	63
III .6.1.3.2	Essais physiques.....	63
III .6.1.3.3	Analyses chimiques.....	63
	Essais mécaniques.....	63

### **Chapitre IV :**

#### ***La formulation pratique d'un béton au laboratoire LHC***

IV		
IV.1	Introduction.....	64
IV.1.1)	Les différentes méthodes de formulation d'un béton .....	64
IV.1.2)	La méthode de Bolomey.....	64
IV.1.3)	La méthode d'ABRAMS .....	65
IV.1.4)	La méthode de Faury .....	65
IV.1.5)	La méthode de Valette.....	66
IV.2	La méthode DREUX-GORISSE.....	67
IV .3	Les Différents Propriétés d'un béton.....	67
IV.3.1)	Les essais réalisés au laboratoire sur béton frais.....	67
IV.4	L'Affaissement au cône d'Abrams .....	68
	Exemple d'une formulation pratique et essais réalisés sur béton au laboratoire	
IV.4.1	LHC.....	69
IV.4.1.1	Fiche Technique de la Composition du beton.....	70
IV.4.1.2	Rapport d'essai.....	71
	La démarche d'un contrôle du béton au LHC .....	79

### ***Conclusion générale***









## *Liste des figures*

N° de figure		Page
I.1	Test du cône d'Abrams	06
II.1	Scléromètre ou marteau de Schmidt	12
II.2	Grille de mesure sur ouvrage	13
II.3	Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter	13
II.4	Appareil de mesure	15
II.5	Mesures en transparence (directe)	17
II.6	Mesures en surface	17
II.7	Mesures semi directe	17
II.8	Courbe RILEM	19
II.9	Schématisation du principe de la méthode maturométrique	21
II.10	Appareil de mesure	22
II.11	Principe de la radiographie [IAEA 02].	23
II.12	Mesures par surface de la thermographie infrarouge [Naar 06]	24
II.13	Image thermique de la surface de bloc mesuré [Naar 06]	24
II.14	Effet d'un vide sur la propagation de la chaleur d'une dalle en béton [Carino 03]	25
II.15	Un système géoradar portatif comportant une antenne centrée sur 400 MHz	27
II.16	Un système géoradar spécial pour les surfaces réduites.	27
II.17	Vue schématique de la méthode Impact-Écho [Hassani 04].	28
II.18	Configuration de test non linéaire : saut temporel [Kodjo 08]	29
II.19	Essai de fendage	30
II.20	Essai de flexion	36
II.21	Portiques pour essais de flexion	37
II.22	Machine d'essais de compression	40
III.1	Equivalent de sable	48
III.2	La masse volumique de gravier 04/16	50
III.3	La masse volumique de gravier 10/25	50
III.4	La masse volumique de sable dune et sable carrière	50

III.5	Analyse granulométrique par tamisage de sable dune	52
III.6	Analyse granulométrique partamisage de sable carrière	52
III.7	Matériel utilisé	53
III.8	L'essai d'étalement au cône d'Abrams	54
III.09	La presse de compression utilisée	55
III.10	Représentation schématique d'un essai ultrason [Malhotra, 2004	56
III.11	Scléromètre utilisé	58
IV .1	L'Affaissement au cône d'Abrams	63
IV.2	Equivalente de sable	67

## *Liste des tableaux*

N° de figure	Titre des tableaux	Page
I.1	vibration recommandé en fonction de l'ouvrabilité du béton. [NET 2]	06
II.1	Moyens de mesure selon type de recul au scléromètre	12
III.1	Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions [Solis-Carcano, 2008]	44
III.2 :	Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions [Solis-Carcano, 2008]	56
IV.1	tableau des valeurs optimales d'Après Abrams du module de finesse des composition	60

## **I. INTRODUCTION :**

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

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

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

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

Ces doutes mèneront vers un contrôle sur les ouvrages réalisés.

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

- Les méthodes destructives
- Les méthodes non destructives

## **II. OBJECTIF :**

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

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

Ce travail se compose de quatre chapitres :

- ❖ **Chapitre I** : Notions générales.
- ❖ **Chapitre II** : Les méthodes de contrôle du béton.
- ❖ **Chapitre III**: Description du laboratoire LNHC et les différentes Méthodes de la formulation d'un béton
- ❖ **Chapitre IV** : La formulation pratique d'un béton au laboratoire LNHC
- ❖ **Conclusion générale.**

## NOTIONS GENERALES

### 1 Béton :

#### 1.1 définition du béton :

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

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

#### 1.2. Résistance caractéristique du béton :

##### 1.2.1. Résistance en compression :

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

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

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

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

- **Déformations instantanées (Eij) :**

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

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

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

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

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

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

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

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

**1.2.2. Résistance à la traction :**

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

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

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

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

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

**Durcie**, avec le temps le béton doit devenir un matériau dur et relativement indéformable c'est-à-dire mécaniquement résistant.

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

Avec sa compacité.

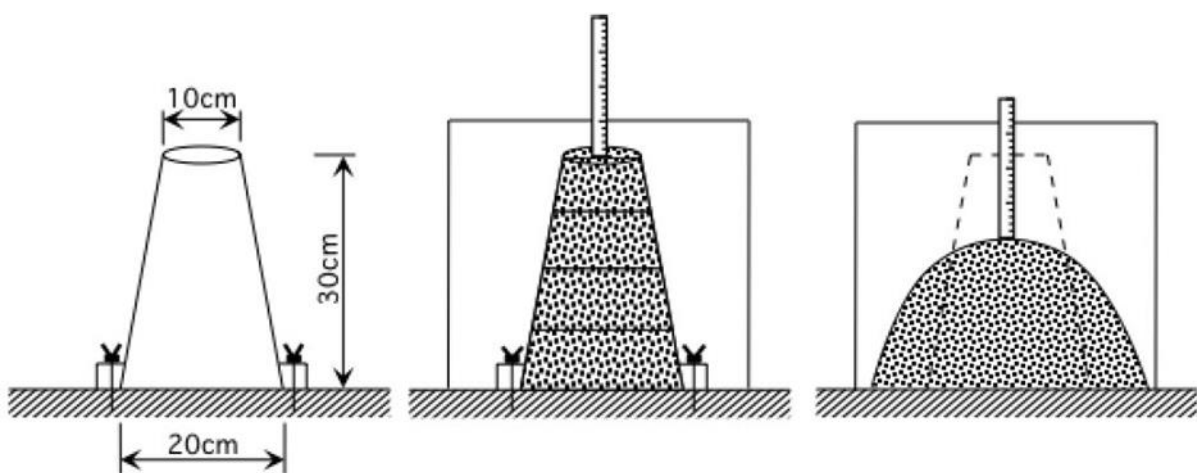
Maniabilité et résistance mécaniques sont deux (02) objectifs contraires :

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

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

### 1.3.1 Béton frais :

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



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



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

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

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

### 1.3.2 Béton durci : [NET 2]

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

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

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

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

Est un ensemble de méthodes qui permettent de caractériser l'état d'intégrité de structures ou de matériaux, sans les dégrader, soit au cours de la production, soit en cours d'utilisation, soit dans le cadre de maintenances. On parle aussi des essais non destructifs (END) ou d'examen non destructifs<sup>1</sup>

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

## 2.1 Historique : [NET 4]

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

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

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

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

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

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

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

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

Et en règle générale dans tous les secteurs produisant :

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

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

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

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

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

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

Les normes NF EN ISO 9712 Août 2012 (qui annule et remplace la norme EN 473) et EN 4179 définissent un certain nombre de symboles pour les méthodes usuelles. Ces symboles correspondent généralement à l'abréviation de la désignation anglaise de la méthode, par exemple, le symbole PT pour le ressuage vient de *penetrant testing*. Cependant, il existe de nombreuses autres méthodes qui ne sont pas sujettes à la certification des contrôleurs, et n'ont donc pas de terminologie normée : c'est le cas par exemple du radar, très utilisé dans le Génie civil.

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

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

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

### 3. Le contrôle destructif

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

#### 3.1. Limite des méthodes destructives :

- mesures locales (ne peuvent être généralisées, sans information préalable peuvent être effectuées au hasard, dans des zones pas forcément représentatives)
- prélèvements pas toujours réalisables (accessibilité, sensibilité des ouvrages, esthétique)
- Coûteux ; ce procédé est cher et endommage la structure, pour cette raison on doit limiter le nombre et les endroits de prélèvement où le béton à examiner.
- L'information acquise n'est pertinente qu'à l'échelle de l'échantillon prélevé qui peut ne présenter qu'un millionième, voir un milliardième de la structure.  
Si le laboratoire est le lieu idéal pour la caractérisation fine de l'interface pâte - granulats, il n'est pas forcément adapté à l'analyse d'objets ou de phénomènes couvrant des échelles plus larges.
- les grandeurs issues de mesures sur carottes sont locales: elles ne peuvent être généralisées sans hypothèse supplémentaire.  
De plus, sans information préalable, la localisation du prélèvement est généralement réalisée de manière subjective sur des zones pas forcément représentatives, qui sont supposées saines ou altérées.
- Il n'est pas toujours possible de réaliser des prélèvements: soit pour des raisons d'accessibilité, soit pour des raisons de sensibilité de l'ouvrage (une centrale nucléaire par exemple ne doit subir aucun préjudice de dégradation liée à un carottage).

## II Les méthodes de contrôles de béton

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

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

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

#### 1. Scléromètre :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 1.3 Appareillage :

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

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



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

### 1.4 Mode Opérateur : [NET 4]

#### 1.4.1 Préparation de la surface :

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

#### 1.4.2 Points de mesures :

La surface de mesure doit être divisée en zones de 400 cm<sup>2</sup> au moins, et structurée en une grille de points de mesure ayant pour espacement  $d = 30 \div 50$  mm. Les points de mesures extrêmes doivent être au moins à 30 mm des bords de la surface testée.

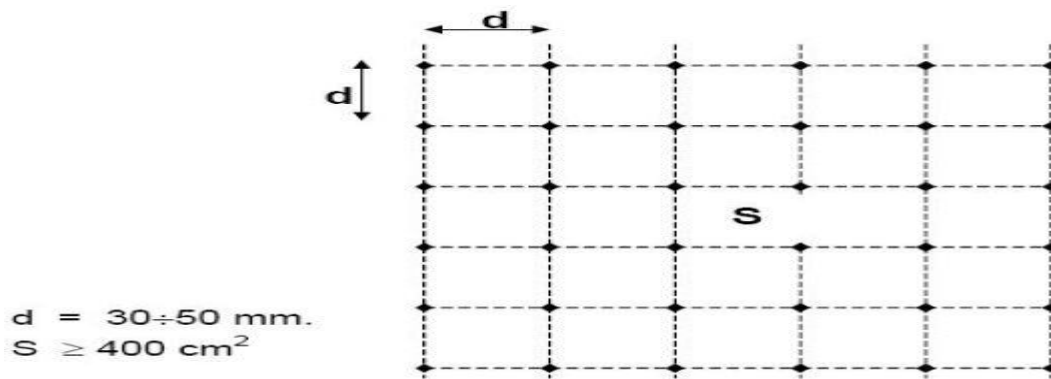


Figure II.2: Grille de mesure sur ouvrage

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

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

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

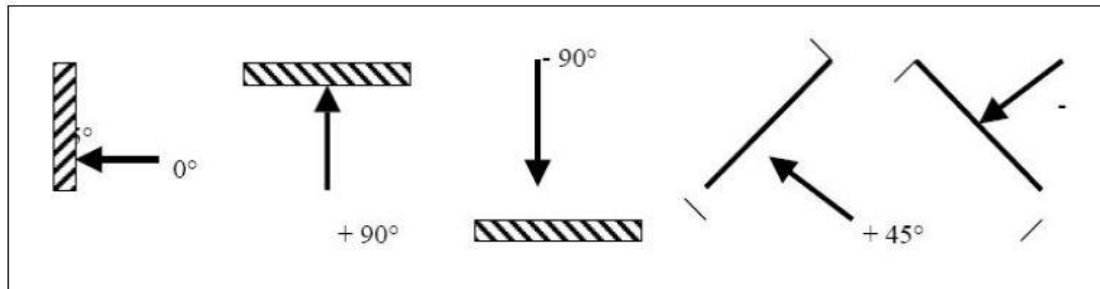


Figure II.3 : Inclinaisons possibles par rapport à l'élément à ausculter

### 1.6 Inconvénients de la méthode sclérométrique :

La méthode sclérométrique constitue une voie directe utilisée pour la détermination du degré d'homogénéité du béton et la dureté de la surface de l'élément en béton. Bien que l'essai au scléromètre soit utile, il ne constitue nullement une mesure fiable de la résistance du béton compte tenu des paramètres influants la précision de détermination de cette résistance. Plusieurs méthodes sont utilisées pour la transformation des indices sclérométriques en résistance mécanique à la compression du béton. [NET 4]



## 1.7 Références normatives :

NF EN 12504-2

## 1.8 Les avantages de la méthode sclérométrique :

- + C'est une méthode peu coûteuse, simple et rapide. FELDMAN (1977).
- + L'essai au scléromètre est comparatif, il est utile pour évaluer l'homogénéité du béton dans une structure ou lors de la fabrication d'éléments semblables des éléments préfabriqués NEVILLE (2000)
- + L'essai peut aussi être utilisé pour vérifier si la valeur de l'indice de rebondissement a atteint la valeur désirée correspondant à la résistance du béton, ce qui peut aider à décider du moment où l'on peut mettre la structure en service.
- + Une utilisation de cet essai est de pouvoir vérifier si le développement de la résistance d'un béton a été affecté par le gel au jeune âge. (Selon la norme ASTM C 805-85 un béton encore gelé peut donner un indice de rebondissement très élevé).
- + Une application particulière de l'essai au scléromètre consiste à évaluer la résistance à l'abrasion des planchers de béton, qui dépend largement de la dureté de surface. [NET 4]

## 2. Méthode d'auscultation dynamique :

### 2.1 Objectif :

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

### 2.2 Principe :

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. D'après LESLIE et CHEESMAN, l'état du béton totalement inconnu peut se déterminer approximativement selon la vitesse mesurée.

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

La fréquence de générateur d'ondes est comprise entre 10 et 150 HZ, le temps de propagation des ondes dans le béton est mesuré par des circuits de mesure électroniques.



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

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

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

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

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

- Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984)
- La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

- Une augmentation de la vitesse des impulsions se produit à des températures sous le point de congélation à cause du gel de l'eau; entre 5 et 30°C, la vitesse des impulsions n'est pas subordonnée à la température. FELDMAN (1977).
- La présence d'acier d'armature dans le béton en particulier l'armature qui suit le trajet de l'onde entraîne une augmentation de la vitesse BUNGEY(1989). Il est par conséquent souhaitable et souvent indispensable de choisir des parcours d'impulsions qui ne sont pas influencés par la présence d'acier d'armature ou d'effectuer des corrections si de l'acier se trouve sur le parcours de l'impulsion.

## **2.3 Mode Opérateur : [NET 4]**

### **2.3.1 Travaux préparatoires :**

- Poncer et égaliser la partie de la surface de l'élément à ausculter où le transducteur sera fixé,
- Employer un matériau intermédiaire entre les deux et en prenant soin de vérifier que l'appareil est bien appliqué contre la surface à tester à l'aide d'un matériau d'interposition comme la vaseline, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de glycérol.

### **2.3.2 Points de mesures :**

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

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

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

## **2.5 Étalonnage de l'appareil :**

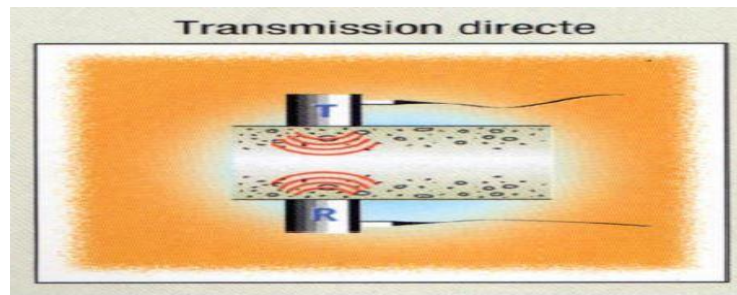
L'ultrason doit toujours être contrôlé par des essais d'étalonnage avant chaque utilisation. L'étalonnage consiste à vérifier le temps de propagation à travers la tige étalon dont le temps est connu à l'avance. Il faut ajuster l'ultrason dans le cas où le temps mesuré ne correspond pas à celui marqué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

## **2.6 Manières de mesure : [NET 4]**

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

### **2.6.1 Mesure en transparence (directe) :**

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



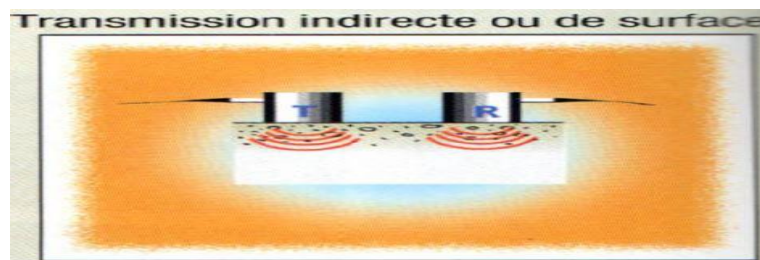
**Figure II.5 :** Mesures en transparence (directe)

### 2.6.2 Mesures en surface (indirecte) :

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

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

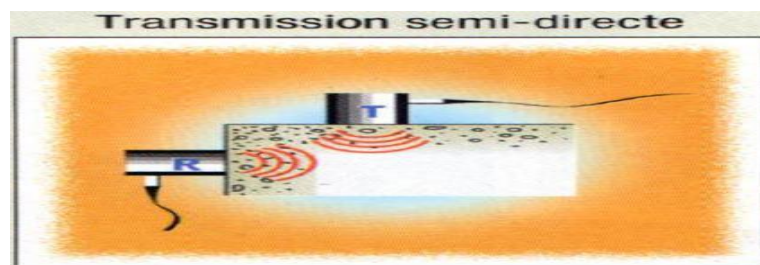
Après avoir relevé le temps correspondant à un point considéré, on passe au point suivant.



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

### 2.6.3 Mesures semi directe :

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



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

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

Dans un milieu homogène et isotrope, la vitesse des ondes longitudinales des ultrasons est reliée au module d'élasticité et à la masse volumique. Cette relation donne une base logique pour utiliser des mesures de vitesse des ondes pour estimer la résistance à la compression du béton. Mais il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique unique entre les deux paramètres compte tenu de l'influence des différents constituants entrant dans la composition du béton. Par conséquent une corrélation plus fiable entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance du béton à la compression ne peut être établie que dans des limites strictes données ci-après.

### 2.7.1 Paramètres influant la vitesse des ultrasons :

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

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

### 2.7.2 Autres interprétations possibles :

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

- Classements qualitatifs :
  - ✚ 2500 m/s  $\leq$  V < 3200 m/s béton de faible résistance,
  - ✚ 3200 m/s  $\leq$  V < 3700 m/s béton de moyenne résistance,
  - ✚ 3700 m/s  $\leq$  V < 4200 m/s béton à haute résistance,
  - ✚ V  $\geq$  4200 m/s béton à très haute résistance.
- Estimation de la résistance du béton selon RILEM

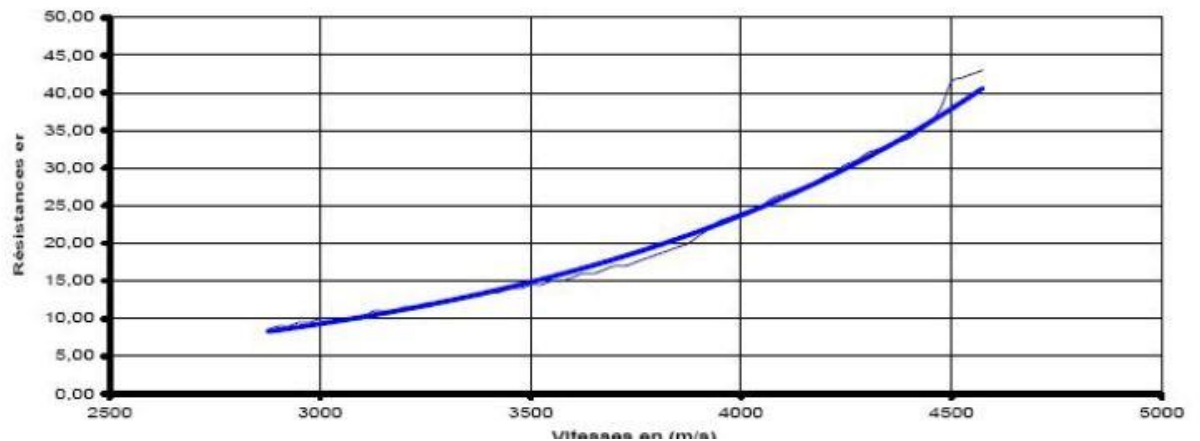


Figure II.8: Courbe RILEM

## 2.8 Références normatives : [NET 4]

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

## 2.9 Les avantages : [NET 4]

- ✚ C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- ✚ L'essai peut être utilisée autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction
- ✚ La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Et selon CHUNG ET LAW l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (mais les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel dégel.
- ✚ ELVERY ET IBRAHIM et pendant leurs études sur la relation de la vitesse et la résistance dans plusieurs âges ont montrés que l'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage.

## 3. La Maturométrie

### 3.1. Fondements de la méthode

La maturométrie s'appuie sur la dépendance de la résistance du béton avec son histoire thermique. La loi d'Arrhenius s'est révélée être la plus appropriée pour décrire la sensibilité de

la vitesse de durcissement du béton à la température. Elle introduit un paramètre unique, l'énergie d'activation apparente  $E_a$ , qui traduit le degré de sensibilité du béton [KadaBenameur 00] :

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

Avec :

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

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

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

### 3.2. Méthode d'essai

Le béton testé est fabriqué en respectant scrupuleusement la formule prévue sur chantier. Si les essais sont effectués sur mortier de béton équivalent, la construction de la formule correspondante à partir de la formule utilisée sur chantier, et la fabrication du mortier, doivent suivre les recommandations spécifiques à cette méthode. Les matériaux sont conservés à la température nécessaire pour le béton ou le mortier confectionné,

### 3.3. Chaîne de mesure [B.M/A]

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

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

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



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

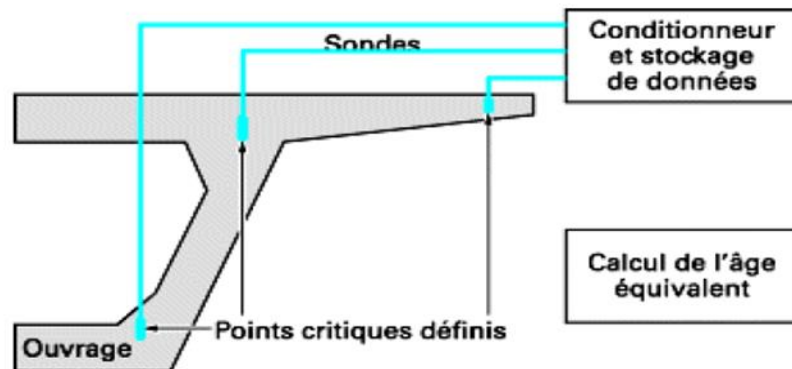


Figure II.9 : schématisation du principe de la méthode maturométrique

### 3.4. Avantages de la maturométrie :

La méthode permet de traiter de façon plus fine l'évaluation de la résistance au jeune âge en définissant, par exemple, les points critiques de l'ouvrage. L'information est quasi-instantanée et ne nécessite pas de transporter des éprouvettes, de fixer ou d'organiser des échéances d'essais de rupture. Elle est également plus riche qu'un simple résultat d'essai de rupture puisque le délai nécessaire à l'obtention de la résistance requise peut facilement être prévu par extrapolation sur la courbe de température. Les données fournies permettent la vérification de la fiabilité des systèmes d'isolation, ou de chauffage in situ. La maturométrie permet d'évaluer le délai d'obtention de résistances en compression au jeune âge supérieures ou égales à 5 MPa. Au delà de cette valeur, la précision de la mesure devient faible et l'utilisation de la maturométrie est déconseillée. Par ailleurs, on couvre habituellement des plages de résistance ne dépassant pas la moitié de la résistance à 28 jours. Il faut noter que, dans le cas particulier de béton à longue période dormante (température faible ou retard lié à l'adjuvantation), la méthode reste applicable, mais peut perdre de son intérêt (résultats d'étalonnage dispersés conduisant à des prévisions parfois trop, pessimistes). [B.M/A]

## 4. Contrôle radiographique

La gammagraphie est une technique d'auscultation qui sert principalement à visualiser le niveau de remplissage en coulis des gaines de précontrainte et à apprécier la qualité de ce coulis, en fonction de son opacité. Les radiogrammes obtenus permettent également d'apprécier l'aspect et la position des fils et des torons dans leur gaine qui sont autant d'indices d'une possible perte de tension. La visualisation directe d'une rupture est extrêmement rare et elle se manifeste plutôt par le fait que le câble festonne, c'est-à-dire que son trajet n'est pas parallèle aux autres. Le troisième type d'information fournie par la



gammagraphie concerne la gaine elle-même : ses déformations ou ses éventuels accidents. L'auscultation permet aussi la visualisation du positionnement du ferrailage passif. Elle permet enfin une appréciation de l'aspect du béton environnant en révélant les hétérogénéités et les fissures. Le positionnement des armatures actives ou passives peut être acquis plus largement et plus facilement par la technique du radar géophysique. [NET 5]



Figure II.10 : Appareil de mesure

#### 4.1. Principes fondamentaux

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

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

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

Où :

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

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

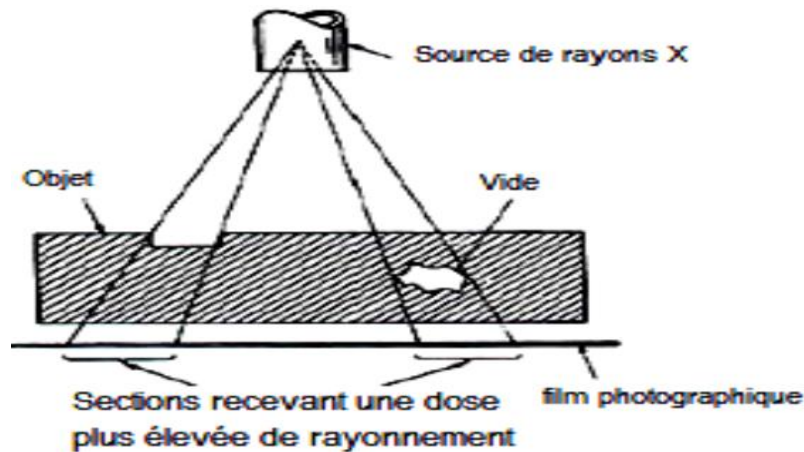


Figure II.11 : principe de la radiographie [IAEA 02].

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

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

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

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

#### 4.3. Applications et limites

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

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

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

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

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

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

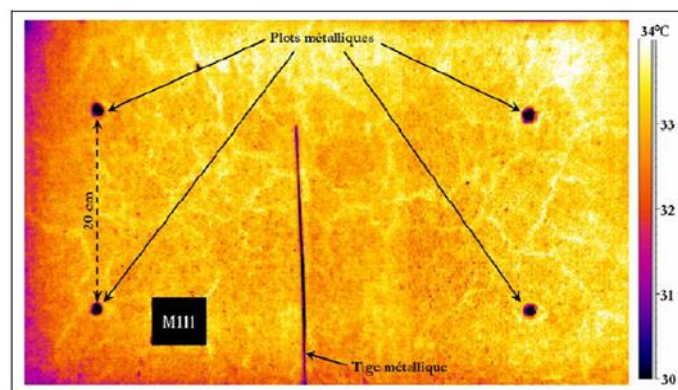
## 5. Thermographie infrarouge

### 5.1 Principes fondamentaux

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



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

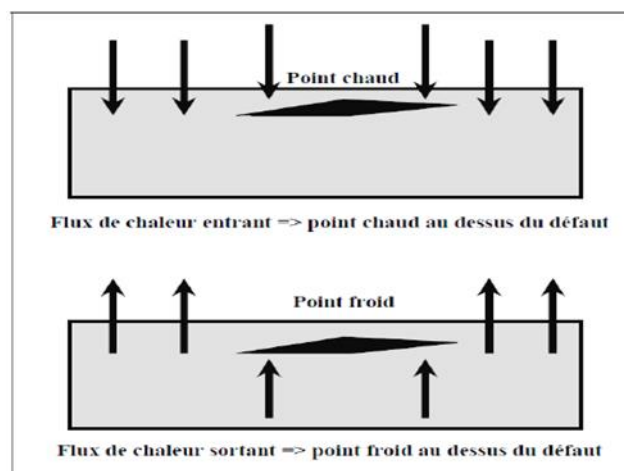


**Figure II.13** : Image thermique de la surface de bloc mesuré [Naar 06]

Les thermogrammes pris avec une caméra infrarouge mesurent la distribution de température à la surface de l'objet au moment de l'essai. Il est important de prendre en considération que cette distribution de la température est le résultat d'un processus dynamique. En prenant un

thermogramme de cet objet à un moment avant ou après, ça peut donner lieu à une distribution de température très différente. Cela est particulièrement vrai lorsque l'objet soit chauffé ou refroidi.

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



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

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

Pour les zones de béton qui ne sont pas accessibles à la lumière du soleil, une alternative est d'utiliser la capacité de stockage de chaleur de la terre pour extraire la chaleur du béton soumis à l'essai. Le point important est que pour utiliser la thermographie infrarouge, la

chaleur doit couler dans le béton. Il n'y a aucune importance concernant le sens de coulée de la chaleur.

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

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

## 5.2 Equipements utilisés dans la thermographie infrarouge

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

## 6. Le Géo radar

### 6.1 Le matériel

Le géoradar fonctionne selon le principe de l'analyse de signaux émis puis réfléchis par des hétérogénéités du milieu étudié. Il prend en compte le temps de trajet aller-retour de l'impulsion électromagnétique ainsi que son amplitude, à la manière d'un échosondeur. Le signal émis possède une large bande de fréquences comprises entre 10 MHz et 2 GHz, l'utilisation de différentes antennes permettant de balayer l'ensemble du spectre en fonction de la profondeur d'investigation désirée et de la taille des objets que l'on recherche. En effet, à basse fréquence (entre 10 et 100 MHz), la profondeur d'investigation est élevée (> 10m) mais la résolution est plus faible. En revanche, pour des antennes centrées sur 1 GHz ou plus, l'inverse est obtenu et permet par exemple de visualiser de fins détails dans les bétons (**figure II.16**).

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



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



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

## 6.2 Application aux bâtiments et ouvrages d'art

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

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

## 7. Impact-écho

### 7.1 Principe de base

Cette technique est basée sur l'étude d'ondes micro sismiques. Une pulsation (onde) est introduite à l'intérieur d'un spécimen en béton par le biais d'une source d'impact d'origine mécanique. L'onde de contrainte se propage alors dans le matériau sous la forme d'un train d'ondes hémisphériques. Ces ondes s'appellent des ondes de front. Les ondes de front sont constituées à la fois d'ondes de compression et de cisaillement. Les ondes de compression et de cisaillement sont reflétées par les interfaces internes du matériau et les bornes du spécimen. Ces ondes sont par la suite reflétées en forme d'écho à la surface où l'impact est produit. Les



échocs produisent des déplacements à la surface qui sont captées par un récepteur et ensuite enregistrés sur un oscilloscope digital. L'oscilloscope enregistre les trois formes d'ondes discutées précédemment. L'onde Rayleigh produit toujours un signal d'une amplitude plus grande que les ondes de compression et de cisaillement grâce à des mouvements elliptiques de surface. Toutefois, ces ondes ne sont pas considérées dans l'analyse Impact-Écho à cause de leur faible pénétration en profondeur. L'onde de compression fait partie de l'information captée par le récepteur. [B.M/A]

## 7.2 Analyse des données

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

[B.M/A]

## 7.3 Le temps de contact

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

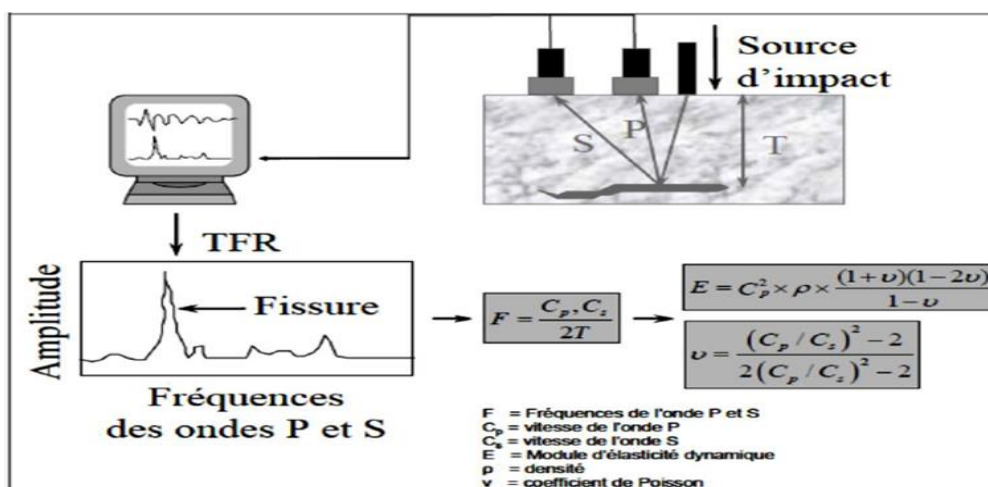


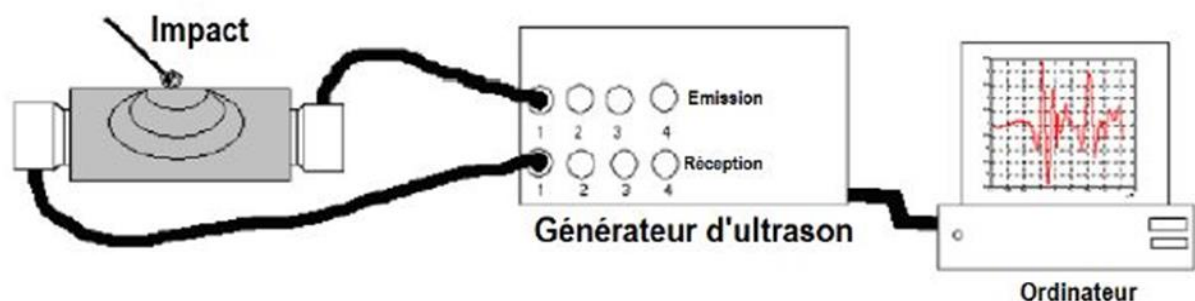
Figure II.17: Vue schématique de la méthode Impact-Écho [Hassani 04].

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

## 8 .Acoustique non linéaire : le saut temporel

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

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



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



## II.B. Contrôles par les méthodes destructives

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

#### 1.1 Objet de la norme

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

Cet essai, qui peut être :

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

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

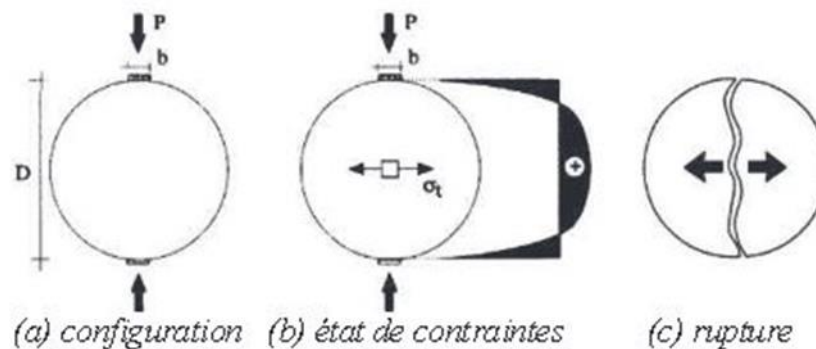


Figure II.19 : essai de fendage

#### 1.2 Eprouvettes

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

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

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

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

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

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

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

### **1.5. Opérations préparatoires**

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

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

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

b) Eprouvettes conservées dans l'eau

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

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

c) Eprouvettes conservées en sachets de polyéthylène

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

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

a) L'éprouvette ayant été essuyée ou nettoyée, la peser avec une erreur relative inférieure à 0.001.

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

- par le volume correspondant aux dimensions de fabrication,

- ou par le volume résultant des dimensions assurées avec une erreur relative inférieure à 0.003

### 1.5.3. Choix des génératrices de chargement

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

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

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

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

## 1.6. Conduite de l'essai

### 1.6.1. Mise en place et centrage de l'éprouvette

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

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

### 1.6.2. Mise en charge

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

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

### 1.6.3. Expression des résultats

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

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

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

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

Cet essai, qui peut être :

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

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

### **2.2. Eprouvettes**

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

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

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

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

Elle doit être contrôlée et étalonnée conformément à ce document.

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

Chaque dispositif de traction, en acier, comprend :

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

### **2.5. Opérations préparatoires**

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

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

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

b) Eprouvettes conservées dans l'eau

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

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

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

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

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

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

c) Eprouvettes conservées en sachet de polyéthylène

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

Renfermer l'éprouvette dans le sachet.

Procéder successivement sur les éprouvettes de la série aux opérations

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

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

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

### **2.5.3. Contrôle des faces de chargement**

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

- L'angle formé par ces faces avec la direction des génératrices ne doit pas différer de  $90^\circ$  de plus de  $\frac{1}{4}^\circ$ , de façon que le défaut de parallélisme soit certainement inférieure à  $1/2^\circ$ .
- chaque face ne doit pas s'écarter d'un plan de contact de plus de 0.15mm

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

### **2.5.4. Détermination de la masse volumique**

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

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

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

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

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

### **2.5.6. Conduite de l'essai**

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

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

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

### - Monter en charge

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

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

Où  $F$  est l'effort de traction maximal en déca newtons, et  $S$  la section normale ou effective de l'éprouvette en  $\text{cm}^2$ .

### - Récupération des plaques de traction

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

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

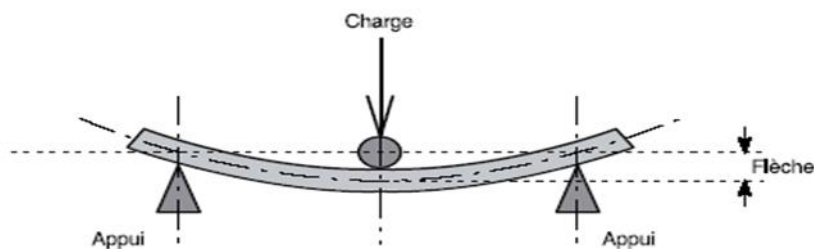
### 3.1. Objet de la norme

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

Cet essai, qui peut être :

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

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



FigureII.20 : Essai de flexion

### 3.2. Résistance à la traction par flexion

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

### 3.3. Eprouvette

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

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

### 3.4. Machine d'essai

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



Figure II.21 : portiques pour essais de flexion

### 3.5. Appareil de chargement

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

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

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

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



### 3.6. Opérations préparatoires

#### 3.6.1. Précautions contre la dessiccation

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### 3.6.4. Conduite de l'essai

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

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

#### - Mise en charge

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

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

### 3.6.5. Expression des résultats

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

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

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

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

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

### 4.1. Objet de la norme

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

Cet essai, qui peut être :

- un essai, de recherche,
  - un essai, d'étude, de convenance ou de détection,
  - un essai, d'information ou de détection,
- permet de déterminer une caractéristique du béton essayé, dite « résistance à la compression ».

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

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

### 4.3. Eprouvettes

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

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

### 4.4. Machine d'essai

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

Elle doit être contrôlée et étalonnée conformément à ces documents.

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



Figure II.22 : Machine d'essais de compression

### 4.5. Opérations préparatoires

#### 4.5.1. Précautions contre la dessiccation

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

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

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

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

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

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

#### c)Epreuves conservées en sachets de polyéthylène

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

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

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

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

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

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

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

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

- par le volume correspondant aux dimensions de fabrication,

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

#### 4.5.3. Surfaçage des extrémités

##### a) Mode opératoire

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

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

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

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

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

#### 4.5.4. Conduite de l'essai

##### - Mise en place dans la presse

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**4.5.5. Expression des résultats**

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

## **Description du Laboratoire Nationale de l'Habitat et de la Construction**

### **Historique et définition :**

Le laboratoire nationale de l'Habitat et de la Construction « LNHC » a été créée en 2008 suite à la filialisation du laboratoire national de l'Habitat et de la construction « LNHC ».

Le LNHC ANTENNE DE GUELMA fait partie du groupe LNHC.

Le LNHC est une entreprise publique économique « EPE/SPA » au capital social de 150.000.000 DA.

Disposant d'un potentiel matériel important et d'un effectif très riche et spécialisé,

Le LHC EST a adopté une ligne de conduite et une démarche qui ont abouti à la certification de ses produits et l'accréditation de l'entreprise.

Ainsi le laboratoire a acquis une notoriété par la reconnaissance de son savoir-faire du fait de la maîtrise de son organisation et de ses méthodes de travail.

Nos clients sont au cœur de nos préoccupations aussi bien en terme de qualité et fiabilité des prestations qui leurs sont fournies, qu'en terme de rapidité d'intervention et d'assistance tout au long du déroulement de leurs projets.

### **-Domaine d'activités et compétences.**

Le LNHC est spécialisé dans :

- Sols et fondations (essais-analyses des sols).
- Contrôle et suivi de qualité sur les matériaux (noir et blanc).
- Expertises d'ouvrages et conseils techniques.
- Reconnaissance géotechnique.
- Sondages carottés.

- Essais In-Situ.
  - Essai de pénétration (dynamique et statique) lourd
  - Essai préssiométrique.
  - Essai SPT.
- Essai de perméabilité sur site.
- Essais de géophysique
  - Sismique.
  - Electrique.

Le LNHC réalise ses prestations pour le compte :

- Des secteurs du bâtiment, des travaux publics et de l'hydraulique.
- Des ministères et des administrations
- Des Wilaya et APC.
- Des entreprises économiques.

Des divers clients

### **Les essais réalisés dans LNHC :**

#### **Les essais sur matériaux et béton :**

#### **Les essais sur matériaux :**

#### **Essai d'équivalent de sable :**

##### **1- But de l'essai**

Cet essai qui s'effectue sur la fraction de sol ou de granulat passant, au tamis à mailles carrés de 5 mm, est réalisé pour déterminer le degré de pollution d'un sol ou d'un sable.

##### **2- Domaine d'application**

Cet essai s'applique dans des nombreux domaines, notamment

- Le choix et contrôle des sols utilisables en stabilisation mécanique
- Contrôle des sols utilisés en stabilisation chimique
- Choix et contrôle des granulats pour les enrobés hydrocarbonés





### 3- Calculs

L'équivalent de sable d'une prise d'essai d'un échantillon est par définition mesuré au piston et donné par la formule :

$$E_s = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

L'équivalent de sable visuel est, dans les mêmes conditions, donné par la formule :

$$E_{sv} = \frac{h_2^2}{h_1} \times 100$$

On a toujours  $E_s < E_{sv}$

Les résultats sont donnés avec une décimale

La détermination portant sur deux prises d'essais par échantillon, l'équivalent de sable Es ou Esv d'un échantillon est la moyenne des équivalents de sable

### La densité des granulats :

On utilise la méthode du ballon

Cette méthode de détermination des masse volumique est plus précise à condition de prendre un certain nombre de précaution

Déterminer avec précision la masse **m1** du ballon rempli d'eau.

Détermination avec précision la masse **m2** d'un échantillon de matériaux sec

Introduire la totalité du matériau dans le ballon, rempli d'eau. Vérifier qu'il n'y a aucune d'air. Peser alors avec précision le ballon, soit **m3**.

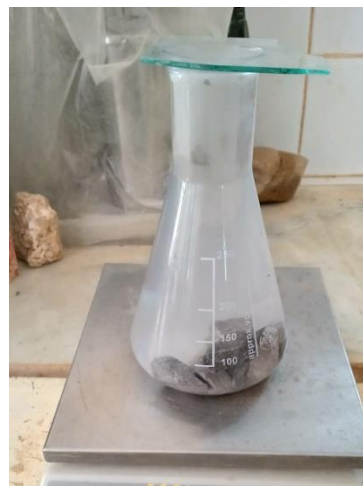
La masse volumique absolue est alors :

$$P \text{ abs} = \frac{m_2}{(m_1 + m_2) - m_3}$$

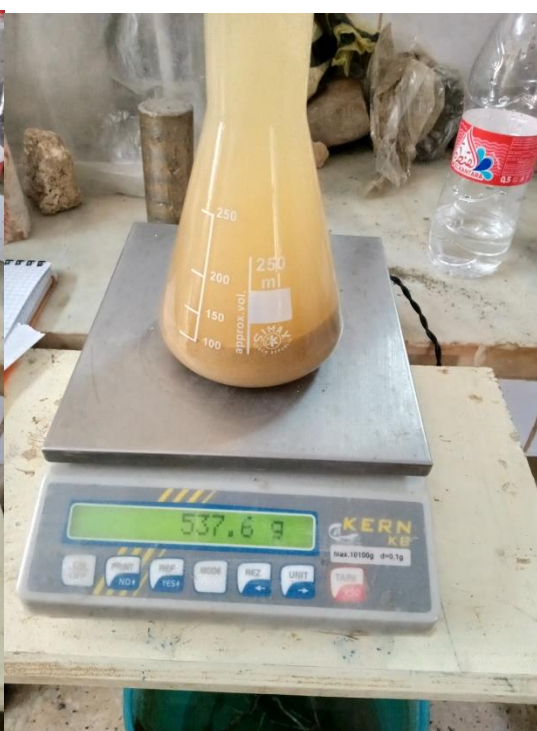
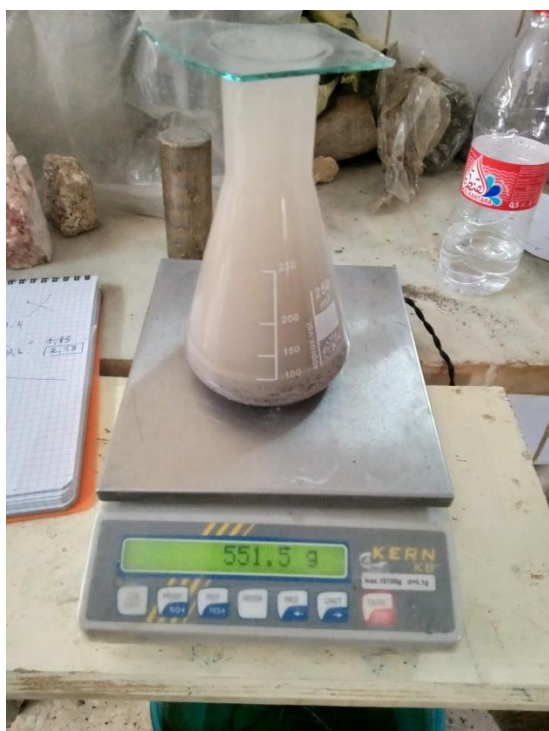
La masse volumique de gravier 4/16



La masse volumique de gravier 10/25



La masse volumique de sable dune et sable carrière :



Analyse granulométrique par tamisage :

2. But de l'essai Analyse granulométrique :

L'analyse granulométrique permet de détecter et miner la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des filets.

A notre qu'il faut éviter la confusion entre la granulométrie qui s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité qui concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat.

## 2. Principe de l'essai analyse granulométrique:

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant un série des tamis, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

## 3. Mode opératoire

- 1) Sécher la prise d'essai a une température de  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  jusqu'à masse constante M1.
- 2) On réalise en suite un tamisage par lavage afin de séparer les élément de dimension inférieur 0.063 mm, au cour du lavage il y'a lieu protéger le tamis 0.063 mm par un ou deux tamis (1mmou 2 mm).
- 3) Le lavage est poursuivi jusqu'à ce que l'eau passant à travers du tamis de 0.063mm soit claire.
- 4) L'échantillon ainsi préparer est alors séché à  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ , après refroidissement il est pesé jusqu'à masse constante M2.
- 5) Le matériau séché est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas vers le haut.
- 6) Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé ; soit R1.
- 7) Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé. Soit R2 la somme de R1+R2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis.
- 8) Cette opération est poursuivie pour tous les tamis ceci permet de connaitre la masse des refus cumules Rn.
- 9) La somme des refus cumulés sur les différents tamis et du tamisât sur le fond doit coïncider avec le poids de l'échantillon introduit en tête de colonne. La perte éventuelle de matériaux pendant l'opération de tamisage ne doit pas excéder plus de 2 % du poids total de l'échantillon
- 10) Calculer le pourcentage de fines (f) passe à travers le tamis 63 mm conformément à l'équation suivante :  $f = \frac{M1-M2}{M1} \times 100$





### **Les essais sur béton :**

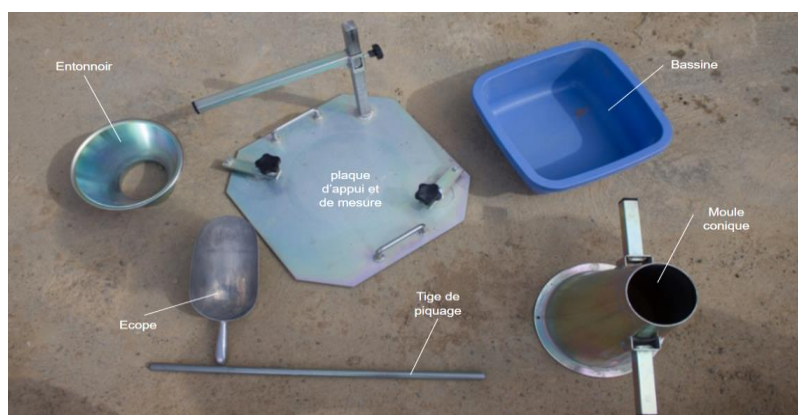
#### **Béton à l'état frais :**

#### **L'affaissement :**

L'essai d'étalement au cône d'Abrams a pour objectif de déterminer le degré de plasticité d'un béton, ce que l'on appelle encore, la classe de consistance. Selon qu'un béton est plus ou moins plastique; c'est à dire mou, on va le classer dans l'une des 5 catégories suivantes :

1. S1 : Béton "Ferme"
2. S2 : Béton "Plastique"
3. S3 : Béton "Très Plastique"
4. S4 : Béton "Fluide"
5. S5 : Béton "Très fluide"

#### **Matériel utilisé :**

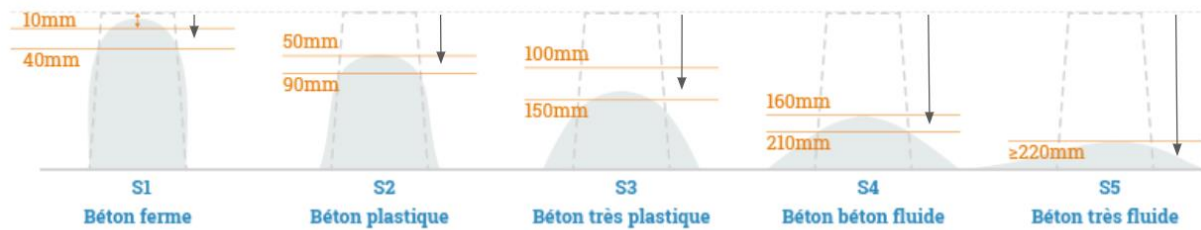


Pour déterminer la classe de consistance du béton testé, on effectue un essai normalisé en 3 étapes, qui rappelle tout simplement le principe du château de sable :

1. On remplit un moule.
2. On démoule.
3. On mesure la hauteur de l'affaissement.

### Mode opératoire

1. On fixe le moule conique sur la plaque d'appui en bloquant la base du cône avec les pattes de fixation.
2. On place l'entonnoir sur le sommet du cône pour faciliter le remplissage.
3. A l'aide de l'écope, on remplit le cône au 1/3 de sa hauteur (première couche).
4. A l'aide de la tige de piquage normalisée (16 mm de diamètre), on pique 25 fois dans la couche.
5. On renouvelle l'opération, sur une seconde et une troisième couche de façon à ce que le cône soit plein.
6. On arase le sommet du cône, à l'aide de la tige, pour le débarrasser du béton en trop.
7. On positionne la potence de mesure de façon à noter la hauteur maximale du cône.
8. On désolidarise le cône de sa base et on le soulève immédiatement à la verticale, en tournant légèrement, pour faciliter le démoulage.
9. Le béton s'affaisse plus ou moins en fonction de sa plasticité.
10. On abaisse la potence jusqu'au sommet du tas de béton affaissé, et on note la valeur de l'affaissement.



### **Béton à l'état durci :**

### **Essai destructif :**

### **Essai de compression :**

La caractéristique essentielle d'un béton à l'état durci est la résistance mécanique en compression à l'âge de 28 jours. Le béton est un matériau qui travaille bien en compression.

La connaissance de ses propriétés mécaniques est donc indispensable pour le dimensionnement et le calcul des ouvrages.

La résistance mécanique en compression du béton est mesurée par compression axiale sur des éprouvettes cylindriques ou cubique.

Les éprouvettes doivent rester dans le moule et être protégées contre les chocs et les vibrations pendant un minimum de 16 heures et un maximum de 3 jours [NF EN 12390-2].

Après démoulage, les éprouvettes doivent généralement être entreposées dans l'eau jusqu'au moment de l'essai à une température de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ .

Pour effectuer ces essais, on a préparé trois éprouvettes cubique ( $15 \times 15 \times 15$ ) (cm) pour chaque âge (7 et 28 jours) dans le but de prendre une valeur moyenne



### Essais non descriptifs :

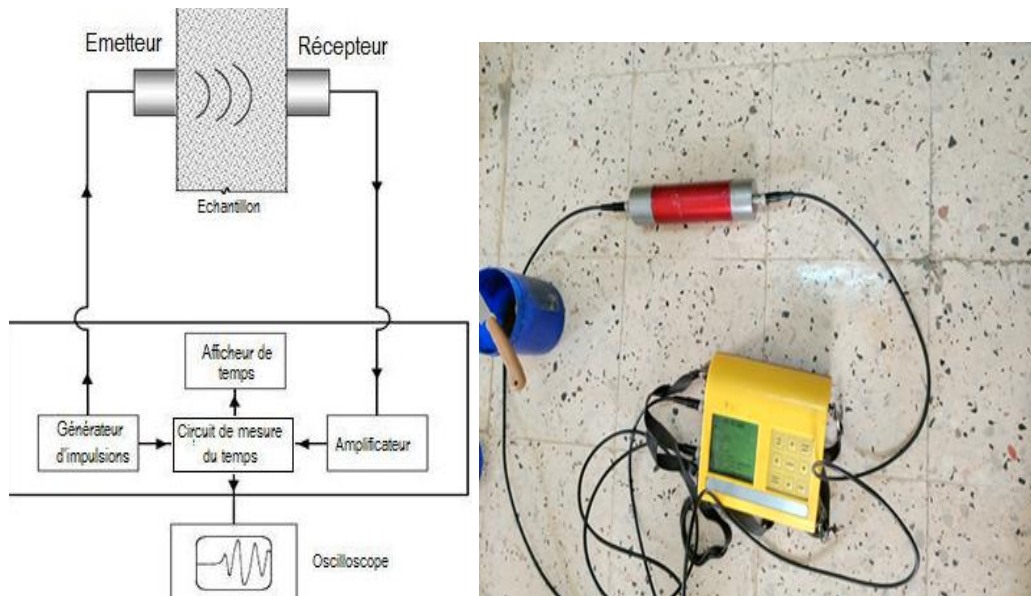
#### Essai ultrasonique :

Les essais aux ultrasons ont été développés pour évaluer la qualité du béton depuis de nombreuses années. La technique a comme but de vérifier l'homogénéité du béton, la durabilité et d'identifier des défauts ou des vides. Aussi, l'essai permet d'estimer la résistance à la compression, le module d'élasticité du béton et le coefficient de Poisson. L'idée fondamentale de la méthode repose sur l'enregistrement de la propagation des ondes mécaniques et de préférence des ondes de compression, car c'est l'onde la plus rapide. Une impulsion d'onde ultrasonique dans le béton est générée à un point sur la surface de l'échantillon et le temps nécessaire à l'onde pour voyager de ce point à l'autre surface est mesuré. Le positionnement des capteurs et la mesure de la distance sont importants. Cependant, l'accès à deux faces n'est pas indispensable. Connaissant la distance entre ces deux points, la vitesse d'impulsion peut être déterminée. Toutefois, plusieurs facteurs affectent la vitesse d'impulsion dans le béton, comme la taille, la forme des gros granulats, le rapport eau/liant, le degré de consolidation, la condition de la cure du béton et



la présence d'armatures [Malhotra et col., 2004].

L'équipement est portable, simple à utiliser et peut inclure une batterie rechargeable. Des capteurs d'une plage de fréquence comprise entre 25 et 100 kHz sont employés habituellement pour les essais aux ultrasons.



Représentation schématique d'un essai ultrason [Malhotra, 2004]

*Qualité du béton et vitesse de propagation des impulsions* [Solis-Carcano, 2008]

Qualité du béton	Vitesse de propagation des impulsions, m/s
Excellente	supérieure à <b>4575</b>
Bonne	<b>3660 – 4575</b>
Douteuse	<b>3050 – 3660</b>
Mauvaise	<b>2135 – 3050</b>
Très mauvaise	inférieure à <b>2135</b>

## Essai au Scléromètre :

### Objectif :

Évaluation de la dureté et de l'homogénéité de surface d'un parement en béton.

Délimitation de zones dégradées (incendie, gel, etc.) ou de zones présentant des caractéristiques mécaniques différentes

**Principe :**

La mesure de la dureté de surface d'un béton est basée sur l'étude du rebond d'une bille d'acier projetée sur sa surface à l'aide d'un ressort taré. La hauteur du rebond qui augmente avec la dureté de surface du béton sollicité, est caractérisée par un indice sclérométrique

Une valeur peut aussi être obtenue en fonction de la différence d'énergie ou de vitesse avant et après l'impact de la masse, avec les nouveaux matériels

Il est possible de réaliser une cartographie des pièces auscultées afin de déterminer l'homogénéité de la surface.

La norme NF EN 13791/CN permet d'évaluer des résistances en compression à partir de mesures d'indices sclérométriques à condition de procéder à un étalonnage sur des éprouvettes prélevées dans la structure et soumises à des essais de compression à rupture, selon des règles précises

**Matériel spécifique employé :**

Un marteau testeur gradué

Un bloc ou une enclume d'étalonnage permettant le réglage de l'appareil

Une pierre à polir

Le cas échéant, un module d'acquisition de données adapté au scléromètre automatisé

Exemple de scléromètre (cerama)

**Domaine d'application :**

Tous types de béton durci et toutes structures dont au moins 1 face est accessible.

Il existe également des appareils pour les matériaux de caractéristiques plus faibles (plâtre, mousse, béton jeune et pour les revêtements ou enduits) : de 0,5 à 25 MPa



## **Les essais géotechniques :**

### **Essais physiques**

- » Teneur en eau, densité humide, granulométrie,
- » Limites d'Atterberg, poids spécifique des grains,...

### **Analyses chimiques**

- » Analyses chimiques du sol, des roches, du ciment, et de l'eau,» Essais du bleu de méthylène

### **Essais mécaniques**

- » Compression simple sur sol et roche
- » Compression à l'odomètre
- » Gonflement libre
- » Cisaillement direct à la boîte et triaxial
- » Consolidation et mesure de perméabilité

# La formulation pratique d'un béton au laboratoire LNGCH

## Introduction

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents composants du béton (granulat, eau, ciment) afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées (résistance, consistance).

On a recours, dans ce cas aux méthodes de détermination des proportions des différents composants où on trouve soit :

- Les méthodes semi-empiriques (FAURY, BOLOMEY, VALLET).
- Les méthodes graphiques (JOISEL, DREUX-GORISSE).

### 4.1 Les différentes méthodes de formulation d'un béton :

Il existe plusieurs méthodes pour la composition du béton. Elles aboutissent à des dosages volumétriques ou de préférence pondéraux, mais le passage de l'une à l'autre peut toujours se faire, si nécessaire, par la connaissance de la densité apparente des granulats en vrac.

On distingue en fonction de la granularité du mélange constituant le béton deux types de méthodes de composition du béton :

#### • à granularité continue :

Lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne sur le graphique granulométrique une courbe s'élevant d'une façon continue du plus petit grain de ciment au plus gros grain des graviers, toutes les grosseurs intermédiaires sont représentées.

#### • à granularité discontinue :

Lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut { un manque d'éléments intermédiaires.

#### 4.1-1) La méthode de BOLOMEY :

Par une formule appropriée on trace une courbe granulométrique de référence et l'on s'efforce de réaliser avec les granulats dont on dispose une composition granulaire totale (ciment compris) dont la courbe granulométrique soit aussi proche que possible de la courbe de référence théorique.

La formule de base est la suivante :  $P=A+(100-A)^{\sqrt{d}}$ .

P : est le pourcentage de grains passant à la passoire de diamètre d

D : est le diamètre du plus gros granulats

A : coefficient varie entre 8 et 16 en fonction du dosage en ciment, sa valeur étant d'autant plus élevée que le dosage en ciment est plus fort.

Cette méthode aboutit, théoriquement tout au moins, à une granularité continue.

#### 4.1.2) La méthode d'ABRAMS :

C'est une règle de mélange basée sur l'obtention d'un certain module de finesse globale pour le mélange de granulats à partir de la connaissance des modules de finesse des granulats à employer.

Le module de finesse du mélange est choisi de telle manière que les vides dans ce mélange soient, en principe, réduits au minimum.

Les modules optimaux pour béton de granulats roulés sont déterminés expérimentalement par Abrams et sont indiqués dans des valeurs tabulées en fonction du dosage en ciment et de la dimension D du plus gros granulats.

Dosage en ciment kg/m <sup>3</sup>	Dimensions D maximale des Granulats						
	10	15	20	25	30	40	60
275	4.05	4.45	4.85	5.25	5.60	5.80	6.00
300	4.25	4.60	5.00	5.40	5.65	5.85	6.20
350	4.30	4.70	5.10	5.50	5.73	5.88	6.30
400	4.40	4.80	5.20	5.60	5.80	5.90	6.40

**Tableau des Valeurs optimales d'après Abrams du module de finesse des compositions.**

La règle du mélange d'Abrams permet de calculer les pourcentages relatifs de granulats de module de finesse MFS et MFG pour obtenir un module de finesse MF choisi pour le mélange.

$$S_s = MFG - MF \text{ et } S_g = MF - MFS$$

$$\text{La proportion de gravier est : } \% \text{ gravier} = (S_g / S) * 100$$

$$\text{La proportion de sable est : } \% \text{ sable} = (S_s / S) * 100$$

$$\text{Où } S = S_s + S_g$$

#### 4.1.3) La méthode de Faury :

**Faury** proposa une nouvelle loi de granulation de type continu, il s'est inspiré pour cela de la théorie de **Caquot** relative à la compacité d'un granulats de dimension uniforme correspondant à un serrage moyen.

La loi de granulation qui en découle est une loi fonction de  $\sqrt{D}$ . La courbe granulométrique idéale conduisant à la compacité maximale est alors théoriquement une droite ; cependant Faury a distingué les grains fins et moyens  $\{<D/2\}$ , des gros grains  $\{>D/2\}$  et la pente de la droite n'est pas la même pour chacune de ces deux catégories. On trace pour l'ensemble du mélange, ciment compris une courbe granulométrique de référence qui est composée de deux droites si l'on opère sur un graphique gradué, en abscisse, en  $\sqrt{D}$ . L'abscisse du point de rencontre de ces deux droites est fixé à  $D/2$  et son ordonnée Y est donnée par une formule tenant compte de la grosseur D du granulats et comportant certains paramètres dont la valeur est une valeur tabulée en fonction de types des granulats (roulés ou concassés) et de la puissance du serrage (simple piquage ou vibration plus ou moins intense).

Y, se calcule par la formule suivante :

$$Y = A + 7\sqrt{D} + BRD - 0.7$$

A : valeur tabulée

B : varie de 1 à 2 selon que le béton ferme ou mou.

D : est exprimé en dimension de passoire.

R : est le rayon moyen du moule

#### 4.1.4) La méthode de Valette :

**R. Valette** a mis au point une méthode essentiellement expérimentale mais qui nécessite cependant un certain nombre de calculs préparatoires. Cette méthode est souvent désignée par « dosage des bétons à compacité maximale » ou « dosage des bétons à minimum de sable » ou « dosage des bétons à granularité discontinue ».

La méthode Valette proprement dite est quelque fois utilisée avec certaines variantes. Dans les cas les plus courants on parlera en général d'un béton binaire: un sable et un gravier présentant le plus souvent une certaine discontinuité (par exemple : sable 0/5 et gravier 16/25). On calcule d'abord le dosage de sable et de ciment devant donner en principe le mortier plein avec un minimum de ciment ; ce dosage s'obtient en mesurant les vides du sable mouillé et en calculant le dosage en ciment permettant de remplir le volume des vides du sable par un volume égal de pâte pure de ciment.

On ajoute en suite le maximum de gravier mouillé compatible avec une ouvrabilité permettant un moulage correct et une mise en oeuvre facile dans les conditions du chantier. On obtient alors le béton plein à minimum de sable et le moins dosé en ciment.

#### **4.1.5) La méthode DREUX-GORISSE :**

C'est une méthode pratique qui simplifie et rend la formulation du béton plus pragmatique. Elle consiste à rechercher conjointement la résistance à la compression et l'ouvrabilité désirée { partir des données de base essentielles pour la formulation du béton telles que la dimension des granulats(D). La méthode de formulation de DREUX-GORISSE permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires { la confection d'un mètre cube de béton conformément au cahier des charges. Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton. Il faut déterminer au préalable le rapport C/E, C et E, le mélange optimal à minimum de vides, la compacité du béton et les masses des granulats.

#### **4.2 Les Différents Propriétés d'un béton :**

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- **1) le béton frais** : mélange de matériaux solides en suspension dans l'eau, se trouve en état foisonné à la sortie des appareils de malaxage et en état compacté après sa mise en oeuvre dans son coffrage ;
- **2) le béton durci** : solide dont les propriétés de résistance mécanique et de durabilité s'acquièrent au cours du déroulement de réactions physico-chimiques entre ses constituants, d'une durée de quelques jours à quelques semaines.

#### **4.3 Les essais réalisés au laboratoire sur béton frais :**

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte { la mise en oeuvre du béton pour le remplissage parfait du coffrage et l'enrobage complet du ferrailage. L'ouvrabilité doit être telle que le béton soit maniable et qu'il conserve son homogénéité. Elle est caractérisée par une grandeur représentative de la consistance du béton frais. Dans le cas de béton ordinaire elle est principalement influencée par :

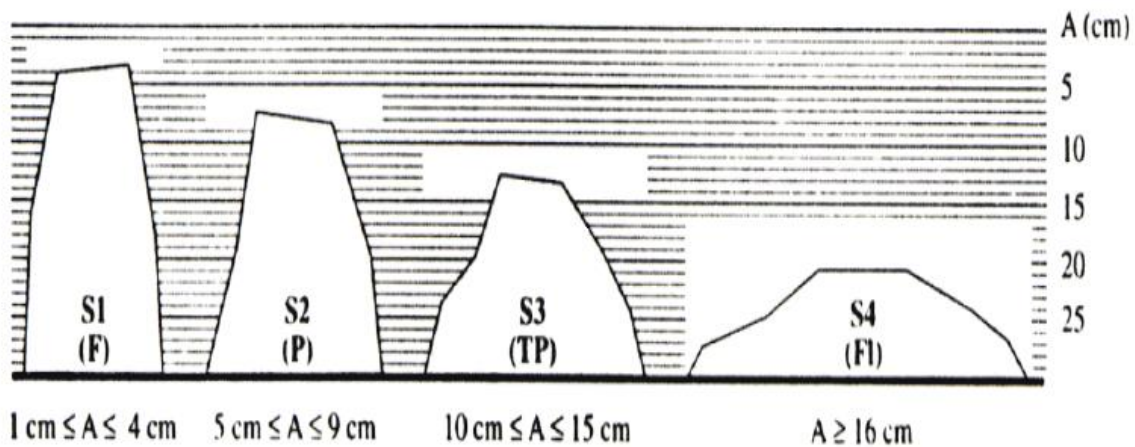
- La nature et le dosage du liant.
- La forme des granulats.
- La granularité et la granulométrie.

- Le dosage en eau.

L'ouvrabilité peut s'apprécier de diverses façon et en particulier par des mesures de plasticité. Il existe de nombreux essais et tests divers permettant la mesure de certaines caractéristiques dont dépend l'ouvrabilité. Nous n'en citerons que quelques uns, les plus couramment utilisés dans la pratique.

#### 4.3.1) L'Affaissement au cône d'Abrams :

Cet essai consiste à mesurer la hauteur d'affaissement d'un volume tronconique de béton frais où ce dernier est compacté dans un moule ayant la forme d'un tronc de cône. Lorsque le cône est soulevé verticalement, l'affaissement du béton permet de mesurer sa consistance.



#### Conclusion :

Il existe plusieurs méthode de formulation de béton mais la méthode la plus utilisées en pratique c'est la méthode Dreux-Gorisse ,et il ya aussi différents essais pour contrôler la qualité de béton et la durabilité et d'autres caractéristiques du béton soit des essais chimiques ; physiques ;mécaniques mais dans le chapitre précédent il ya quelque essais mécanique et physiques réalisés sur le béton.



## **Exemple d'une formulation pratique et essais réalisés sur béton au laboratoire LNHC**

### **Compte rendu**

### **Etude de béton**

Suite à la demande du client....., par le bon de commande 276 -24-2020. Le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC) Antenne de Guelma a procédé à des analyses sur le gravier 5/15 mm ; 15/25 mm de la carrière Bousselba Guelma ;, Sable de dune 0/4 sablière Tebessa, ciment 42,5 de Hedjar Essoude prélevés par le client aux fin d'une formulation de béton avec essai d'étude destinés au projet : .....

- I) Qualité des matériaux :
- 1) Sable de dune jaunatre
    - Densité apparente  $DA=1.32 \text{ t/m}^3$
    - Poids spécifique :  $PS=2,61 \text{ t/m}^3$
    - Equivalent de sable  $ES= 70,5 \%$
  - 2)
    -

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale

En générale le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, air, granulats et le plus souvent, adjuvants qui doivent constituer un ensemble homogène. Les composants sont très différents en fonction de la nature recherchée. La pâte de ciment, est l'élément actif du béton qui enrobe les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains.

L'étude de la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose, ainsi que le dosage en ciment et en eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou de la partie d'ouvrage en cause. Les méthodes les plus connues pour la formulation sont les méthodes de : Bolomey , Abrams, Faury, Valette, Joisel, Dreux...mais la méthode la plus utilisée et la plus connue en Algérie c'est la méthode Dreux- Gorisse.

Plusieurs types de béton existent en réalité selon leur destination, résistance, affaissement ....Etc. plusieurs facteurs influent sur la qualité d'un béton comme la qualité des agrégats ; le type de ciment et essentiellement les adjuvants qui sont très différenciés et jouent un rôle très sensible sur la qualité de béton.

Le contrôle de la qualité de béton se fait par plusieurs essais qui peut être destructifs comme l'essai de compression, flexion, et traction ...Etc. ou bien non destructifs comme l'essai d'auscultation dynamique et l'essai de mesure de la dureté au choc (scléromètre) ou des essais a l'état frais d'un béton comme l'essai le plus connue d'affaissement, et il ya d'autres essais comme les différents essais chimiques etc...

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

- Lorsque la réalisation des prélèvements est impossible soit pour des raisons d'accessibilité ou de sensibilité de l'ouvrage nous sommes obligés de procéder à des méthodes non destructives mais l'interprétation des résultats doit prendre en compte les corrélations entre les deux méthodes.
- Les méthodes non destructives peuvent être utilisées comme des techniques additionnelles lorsqu'elles seront exécutées avec des méthodes destructives.

## Conclusion générale

---

- Les essais d'arrachement peuvent être remplacés par les essais non destructifs tout en s'intéressant à l'état de surface.
- Pour le béton âgé les essais sclérométriques conviennent mieux pour l'évaluation de la qualité du béton.

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

## Références bibliographiques

**[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

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

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

**[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, universite Abou Bekr Belkaid Tlemcen, juin 2012

**[K.N] Nasr-eddine Kedjor,** «Le laboratoire du béton». Office des publications universitaire. (Grèce), 75 p., Juin, 2003.

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

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

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

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

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

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

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

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

## **NETOGRAPHIE**

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

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

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

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

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