



**Ministère de l'Enseignement Supérieure  
et de la Recherche Scientifique**



**UNIVERSITÉ DE M'SILA**

**FACULTÉ DE TECHNOLOGIE**

**Département de génie civil**

**MÉMOIRE**

**Présenté pour l'obtention d'un diplôme de  
MASTER**

**Filière : GÉNIE CIVIL  
Option : MATÉRIAUX**

**THÈME**

**Corrélation et optimisation des caractéristiques  
physiques et mécaniques d'un béton soulagé de  
différentes fractions de polystyrène par les méthodes  
dynamiques (CND).**

**Proposé et dirigé par :**

**AMOUR AHMED, M.A.A, Encadreur.**

**Présenté par :**

**MAYOUF EL MOATAZ BILLEH**

**Promotion : 2013/2014.**



## *Remerciement :*

*Merci ! C'est un petit mot tout simple mais qui pèse lourd. Un grand merci, un petit merci, peu importe sa taille, il n'a pas de dimension .C'est un signe de reconnaissance qui ne connaît pas d'indifférence.*

*Merci, Dr Amour.A, qui a encadré ce travail, pour sa disponibilité, pour son écoute, pour ses grandes qualités pédagogiques, ainsi que pour sa rigueur scientifique, qu'il a su me communiquer pour mener au mieux ce travail.*



*Merci, chers parents, vous, source de mon énergie dans la vie, base de ma réussite et mon appui dans tous les temps.*

*Merci et encore merci mes professeurs qui ont contribué à mon apprentissage et à mon savoir depuis l'école primaire jusqu'à l'université*

*Merci, à ma famille, mon frère et ma sœur de m'avoir encouragé et soutenu.*

*Merci, mes chères amies et mes chers camarades pour m'avoir permis de passer cinq belles années à l'université.*

*Merci, à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*



# *Dédicace*

قال الله تعالى { يرفع الله الذين آمنوا منكم والذين أوتوا العلم درجات والله بما تعملون خبير }  
المجادلة: 11

*« Aucune profession n'est aussi exigeante que la profession d'enseignant,  
car aucune n'exige que ses membres sachent jouer autant de rôles  
différents. »*

**P. WOODRING**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes très chers parents : RABIE et BAHRIA,*

*Mon frère : MOUHAMED,*

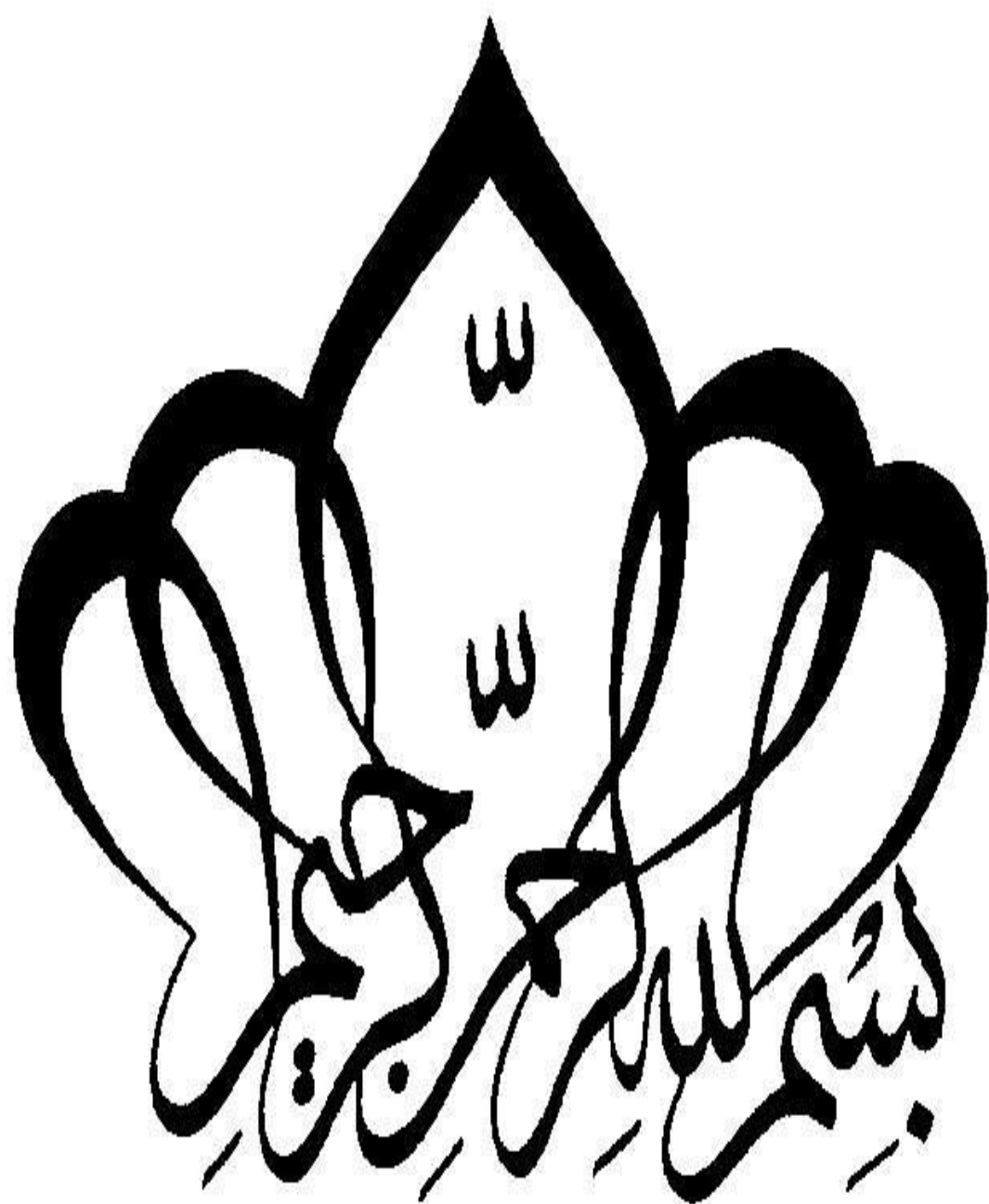
*Ma tendre sœur : FATIMA,*

*Ma famille grands et petits, mes camarades, mes amies et surtout tous  
mes enseignants,*

*Au monde du génie-civil*

*A tous ceux qui me connaissent*

**MAYOUF EL MOATAZ BILLEH.**



# Résumé

Le contrôle et l'évaluation non destructifs de structures en béton par analyse d'ondes acoustiques sont utilisés depuis longtemps, mais seules des démarches empiriques robustes avaient permis de répondre partiellement aux questions posées. Aujourd'hui, les travaux de développement et de recherche réalisés permettent de prendre en compte la majeure partie des paramètres influents et d'améliorer ainsi l'ensemble des aspects du contrôle. Des progrès ont notamment été apportés dans le cadre de la compréhension des phénomènes de propagation des ondes, ainsi que dans les procédures d'évaluation et de traitement des informations recueillies. La prise en compte de la multidiffusion des ondes cohérentes doit notamment être poursuivie. Il devient nécessaire, entre autres, de suivre la teneur et la répartition des billes polystyrènes expansé ou les vides d'air enserrés dans les porosités et/ou fissures, mais encore de rendre compte de l'interaction des ondes avec des obstacles de plus en plus proches de la réalité en termes de morphologie. Les axes de recherche concernant la rétrodiffusion et les ondes cohérentes et incohérentes font également l'objet de développements importants.

Ils permettront de pouvoir se servir de toutes les sources d'information pertinentes possibles, notamment dans le cas du contrôle in situ. Un bilan fidèle de la propagation des ondes acoustiques, révélatrice des nombreuses caractéristiques mécaniques du béton et de leur évolution, pourra ainsi être réalisé.

**Mots clés** : ultrasons. Différents matériaux, évaluation, porosité, transformée en ondelettes .

# *Abstract*

The control and the assessment non destructive structures made of concrete by analysis of acoustic waves are used for a long time, but only some robust empiric steps had permitted to answer the calm questions partially. Today, works of develops - lies and of achieved research permit to take in account the major part of the influential parameters and to improve the set of the aspects of the control thus. Progress has been brought notably in the setting of the understanding of the phenomena of propagation of the waves, as well as in the procedures of assessment and treatment of the introverted information. The hold in account of the multicasting of the coherent waves must be pursued notably. He/it becomes necessary, among others, to follow the content and the distribution of the balls polystyrenes expanse or the emptiness of air enclosed in the porosities and/or f cracks, but again to make account of the interaction of the waves with obstacles more and more near of the reality is terms of morphology. The axes of research concerning the retro diffusion and the coherent and disjointed waves are also the subject of important developments. They will permit to be able to use all applicable sources of information possible, notably in the case of the control in situ. A balance Fidel of the propagation of the acoustic waves, revealing of the numerous mechanical features of the concrete and their evolution, will be able to be achieved thus.

**Keywords:** ultrasounds ,divers materials, evaluation, porosity wavelt transfomis.

# ملخص

التقييم بالتقنية الغير مدمرة المستعملة للأمواج الميكانيكية مافوق الصوتية لدراسة المواد الغير متجانسة يشكل أداة استقصاء ذات امتياز للبحث والتشخيص للأعطاب الحرجة المخفية . الأعطاب المتقصية هي المسامات التشققات الرواسب في حالة الفحص ، حصر عطب داخلي في العينة حصل على إشارات موجية مافوق صوتية.

دراسة البحث هذا تعالج التحليل بالتحويلات الموجية. طبقت هذه الدراسة على الإشارات مافوق الصوتية عند سبر العينة والتشخيص للأعطاب الحرجة المخفية العينات مؤلفة من مواد متعددة. اسمنت حصى رمل بوليستير ماء. هذه العينات مأونة من فجوات مصنعة ومسامات حقيقية.

**الكلمات المفتاحية:** الموجات ما فوق صوتية ، مواد متعددة ، التقييم ، المسامات التحويلات الموجية.

# **SOMMAIRE**

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>01</b>
<b>CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
I.1.Introduction .....	<b>03</b>
I.2.Le béton.....	<b>04</b>
I.2.1.Définition .....	<b>04</b>
I.2.2.Constituants du béton .....	<b>05</b>
I.2.2.1.Ciment .....	<b>05</b>
I.2.2.2.Granulats .....	<b>18</b>
I.2.2.3.Sable.....	<b>21</b>
I.2.2.4.eau de gâchage .....	<b>22</b>
I.2.2.5.Le	<b>23</b>
polystyrène.....	
I .2.3.types de bétons .....	<b>26</b>
I .2.3. 1. Leur destination .....	<b>27</b>
I .2.3.2.Leur masse volumique.....	<b>27</b>
I .2.3.3. Leur granularité.....	<b>27</b>
I .2.3.4. Leur consistance .....	<b>27</b>
I .2.3.5.Leur résistance à la compression sur cylindre fck.....	<b>28</b>
I .2.4.Propriétés du béton .....	<b>28</b>
I .2.4.1 Propriétés du béton frais .....	<b>28</b>
I .2.4.2 Propriétés du béton durci .....	<b>29</b>
I .3.Conclusion .....	<b>29</b>
<b>CHAPITRE II : CONTEXTE DU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF.</b>	
II.1. Généralité. ....	<b>30</b>
II.2. Définition de CND. ....	<b>31</b>
II.3. Principe du CND. ....	<b>31</b>
II.4. Les objectifs du CND. ....	<b>31</b>
II.5. Les différentes techniques. ....	<b>32</b>
II.5.1. Procédés optiques. ....	<b>32</b>
II.5.2. Ressuage. ....	<b>33</b>
II.5.3. Radiographie. ....	<b>34</b>
II.5.4. Ultrasons. ....	<b>35</b>
II.5.5. Flux de fuite magnétique. ....	<b>36</b>
II.5.6. Courants de Foucault. ....	<b>37</b>
II.6. Propagation des ondes. ....	<b>38</b>
II.6.1. Nature des ondes. ....	<b>38</b>
II.6.2. Le phénomène de propagation des ondes. ....	<b>39</b>
II.7. Avantage de CND. ....	<b>39</b>
II.8. Le contrôle non destructif par ultrasons. ....	<b>39</b>
II.8.1. Introduction. ....	<b>39</b>
II.8.2. Définition des ultrasons. ....	<b>40</b>
II.8.3. Les avantages principaux de mesure par ultrasons. ....	<b>41</b>
II.8.4. Détection des défauts. ....	<b>42</b>
II.8.5. La propagation des ondes ultrasonores. ....	<b>42</b>

II.8.6. Émission et réception de l'onde ultrasonore. ....	46
II.8.7. Vitesse de propagation des ultrasons. ....	48
II.8.8. Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons. ....	48
II.9. L'Atténuation de propagation ultrasonore. ....	49
II.9.1. Généralités et définition de l'atténuation. ....	49
II.9.2. Méthodes de mesure de l'atténuation ultrasonore. ....	51
II.10. Conclusion. ....	51
<b>CHAPITRE III : LA COMPACTITÉ, LA POROSITÉ ET LA DENSITÉ DES MATÉRIAUX.</b>	
III.1. La compacité. ....	52
III.1.1. Définition. ....	52
III.1.2. Modèle d'empilement compressible. ....	52
III.2. La porosité. ....	54
III.2.1. Introduction sur la porosité. ....	54
III.2.2. Définition d'une porosité. ....	56
III.2.3. Différents types de porosités. ....	56
III.2.4. Quelques exemples de milieux poreux. ....	57
III.2.5. Micro-éléments. ....	59
III.2.6. Les Liaisons. ....	60
III.2.7. La Microstructure. ....	60
III.2.8. Pourcentage de la porosité de quelques matériaux. ....	61
III.3. La relation entre la compacité et la porosité. ....	63
III.4. La densité des matériaux. ....	63
III.4.1. Histoire et terminologie. ....	63
III.4.2. Définition. ....	63
III.4.3. Expression de la densité. ....	64
III.4.4. La densité des Minéraux et fluide. ....	64
III.4.5. La densité des Roches. ....	65
<b>CHAPITRE IV : LES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX :</b>	
IV.1. Introduction. ....	66
IV.1.1. Les liants (ciment). ....	66
IV.1.2. Les sable. ....	67
IV.1.3. Les granulats. ....	67
IV.1.4. Les polystyrènes. ....	68
IV.1.5. L'eau de gâchage. ....	68
IV.2. Analyse Granulométriques. ....	68
IV.2.2. Principe de l'essai. ....	68
IV.2.3. Équipements utilisés. ....	68
IV.2.4. Description de l'essai. ....	69
IV.2.5. Module de finesse du sable. ....	71
IV.2.6. Courbe Granulométrique. ....	72
IV.3. Les caractéristiques physiques des matériaux. ....	72
IV.3.1. Sable (0/5). ....	72
IV.3.1.1. Équivalent de sable. ....	72
IV.3.1.2. Masses volumiques absolues. ....	75
IV.3.1.3. Masses volumiques apparent du sable. ....	77
IV.3.1.4. La porosité du sable. ....	79
IV.3.1.5. Compacité du sable. ....	79
IV.3.1.6. Indice des vides du sable. ....	80
IV.3.1.7. Teneur en eau. ....	80
IV.3.1.8. Degré d'absorption d'eau. ....	81

IV.3.2.Graviers (3/8) et (8/16). .....	81
IV.3.2.1.Masse volumique absolues des graviers. ....	81
IV.3.2.2.Masses volumiques apparent des graviers. ....	83
IV.3.2.3.La porosité des graviers. ....	84
IV.3.2.4.Compacité des graviers. ....	84
IV.3.2.5.Indice des vides des graviers. ....	85
IV.3.2.6.Teneur en eau des graviers. ....	85
IV.3.2.7.Degré d'absorption d'eau des graviers. ....	86
IV.3.3. Ciment CPJ-CEM II / 42,5. ....	86
IV.3.3.1.Description. ....	86
IV.3.3.2.Résultats. ....	87
IV.4.Les caractéristiques mécanique des graviers (3/8), (8/16). ....	87
IV.4.1. Essai Los Angeles. ....	87
IV.4.2. Essai Micro Deval. ....	89
IV.5.Les Caractéristiques chimiques des matériaux utilisés. ....	91
IV.5.1.Sable. ....	91
IV.5.2.Graviers (3/8) ;(8/15). ....	91
IV.5.3.Ciment. ....	91
IV.5.4.Eau. ....	91
IV.6.Les polystyrènes. ....	92
IV.6.1.Caractéristiques physique. ....	92
IV.6.2.Caractéristiques mécanique. ....	92
IV.6.3.Caractéristiques acoustique. ....	93
IV.6.4.Caractéristiques électrochimiques et électriques. ....	93
IV.6.5.Autre caractéristiques. ....	93
IV.6.6.Conductivité thermique et masse volumique. ....	94
IV.6.7.Caractéristiques étudiées pratiquement :( La masse volumique apparente). ....	94
IV.6.7.1.Mode opératoire. ....	94
IV.6.7.2.Formulation. ....	94
IV.6.7.3.Résultats. ....	94
IV.7.Conclusion. ....	95
<b>CHAPITRE V : TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES.</b>	
V.1. Introduction. ....	96
V.2. Définition du béton. ....	96
V.3. Détermination de la composition du béton. ....	96
V.4. Formulation des différentes compositions testées (La méthode de Dreux-Gorisse). ....	97
V.5. Confection et cure des éprouvettes. ....	103
V.5.1. Moules pour éprouvettes. ....	103
V.5.2. Confection des éprouvettes. ....	103
V.5.3. Conservation des éprouvettes. ....	104
V.6. Essais effectués sur les bétons. ....	105
V.6.1. Essai du béton à l'état frais. ....	105
V.6.1.1. Définition. ....	105
V.6.1.2. Essai d'affaissement. ....	105
V.6.1.3. Masse volumique. ....	107
V.6.2. Essai du béton à l'état durci. ....	107
V.6.2.1. Masse volumique. ....	107
V.6.2.2. Essai non destructif du béton. ....	108
V.6.2.2.1.Définition. ....	108

V.6.2.2.2.Essai d'auscultation sonique. ....	108
V.6.2.3. Essai destructif du béton. ....	110
V.6.2.3.1.Essai résistance à la compression. ....	110
V.7. Conclusion. ....	111
<b>CHAPITRE VI :RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION :</b>	
VI.1.Introduction. ....	112
VI.2.Les résultats des poids avec le pourcentage du polystyrène des échantillons. ....	112
VI.3.Les essais non destructifs. ....	115
VI.3.1.Essais ultrasonique. ....	115
<b>CONCLUSIONS GÉNÉRALE et RECOMMANDATIONS.</b>	
1. Conclusion Générale. ....	119
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.</b>	<b>120</b>

# ***LISTE DES TABLEAUX***

<b>N° des tableaux</b>	<b>Intitulé</b>	<b>N° des pages</b>
	<b>CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
Tableau I.1	- Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition.	14
Tableau I.2	- Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe.	14
Tableau I.3	- Limite des classes et sous classes de résistances.	15
Tableau I.4	- les différentes classes des granulats.	18
Tableau I.5	- Refus cumulés sur tamis.	21
Tableau I.6	-Types de béton en fonction de leur destination.	27
Tableau I.7	-Types de béton en fonction de leur masse volumique.	27
Tableau I.8	-Types de béton en fonction de $D_{max}$ .	27
Tableau I.9	-Types de béton en fonction de leur consistance.	27
	<b>CHAPITRE III : LA COMPACTITÉ, LA POROSITÉ ET LA DENSITÉ DES MATÉRIAUX.</b>	
Tableau III.1	-Classification de la porosité selon l'IUPAC(*)	56
	<b>CHAPITRE IV : LES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX</b>	
Tableau IV.1	- Analyse granulométrique pour le gravier (3/8).	70
Tableau IV.2	- Analyse granulométrique pour le gravier (8/15).	70
Tableau IV.3	-Analyse granulométrique du sable.	70
Tableau IV.4	-Les normes soviétiques spécifient de MF des sables.	71
Tableau IV.5	- Équivalent de sable.	75
Tableau IV.6	-Les normes soviétiques spécifient d'Équivalent de sable.	75
Tableau IV.7	- Masses volumiques absolues du sable.	77
Tableau IV.8	- La masse volumique apparente du sable.	78
Tableau IV.9	-La porosité du sable.	79
Tableau IV.10	- Compacité du sable.	79
Tableau IV.11	- Indice des vides du sable.	80
Tableau IV.12	- La teneur en eau du sable.	81
Tableau IV.13	- La Degré d'absorption d'eau du sable.	81
Tableau IV.14	- Masses volumiques absolues des graviers.	82
Tableau IV.15	- Masses volumiques apparent des graviers.	84
Tableau IV.16	- La porosité des graviers.	84
Tableau IV.17	- La compacité des graviers.	85
Tableau IV.18	- Indice des vides des graviers.	85
Tableau IV.19	- La teneur en eau des gravies.	85
Tableau IV.20	- La Degré d'absorption d'eau des graviers.	86
Tableau IV.21	- Caractéristiques du ciment CPJ-CEM II.	87
Tableau IV.22	- Essai Los Angeles des graviers (3/8), (8/16).	88

Tableau IV.23	- Classification des roche en fonction du coefficient $L_A$	89
Tableau IV.24	- Essai Micro Deval des graviers.	90
Tableau IV.25	-Classification de la roche en fonction du coefficient Micro Deval.	90
Tableau IV.26	- Analyse chimique du sable de BOUSSAÂDA.	91
Tableau IV.27	- Analyse chimique de la pierre concassée.	91
Tableau IV.28	-Caractéristiques chimiques du CPJ.	91
Tableau IV.29	-Caractéristiques minéralogique du CPJ.	92
Tableau IV.30	-Caractéristiques chimique d'eau.	92
Tableau IV.31	- Caractéristiques de polystyrène ( $\alpha, \lambda, \pi$ et $M$ ).	92
Tableau IV.32	- Caractéristiques de l polystyrène ( $C, \theta, \rho$ et $P$ ).	92
Tableau IV.33	- Caractéristique de polystyrène ( $\sigma_t, \sigma_c, E$ et $\sigma$ ).	93
Tableau IV.34	- Caractéristique de polystyrène ( $E$ et $A$ ).	93
Tableau IV.35	- Caractéristique de polystyrène ( $V$ et $f_c$ ).	93
Tableau IV.36	-Caractéristique de polystyrène ( $\theta$ et $\rho$ ).	93
Tableau IV.37	- Caractéristique de polystyrène ( $\tau, HR, U, C$ , et $P$ ).	93
Tableau IV.38	- Conductivité thermique et masse volumique.	94
Tableau IV.39	-Masses volumiques apparent de polystyrène.	94
<b>CHAPITRE V : TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES</b>		
Tableau V.1	-Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats	98
Tableau V.2	-Valeurs de K	99
Tableau V.3	-Valeurs du coefficient de compacité	100
Tableau V.4	-Les résultats de la formulation du différent béton	103
Tableau V.5	- Les normes des classes de l'affaissement mesurent.	106
<b>CHAPITRE VI: RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION</b>		
Tableau VI.1	-Poids des éprouvettes après 28 jours.	113
Tableau VI.2	-Les valeurs de temps et la vitesse de propagation de son.	115

# ***LISTE DES PHOTOS***

N° des photos	Intitulé	N° des pages
	<b>CHAPITRE IV : LES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX</b>	
Photo IV.1	- les constitué de béton.	66
Photo IV.2	- Une étuve thermo statée.	69
Photo IV.3	- Une balance.	69
Photo IV.4	- Un vibro-tamis électrique.	69
Photo IV.5	- Des tamis de différents diamètres.	69
Photo IV.6	- Matériels utilisés pour Équivalent de sable.	73
Photo IV.7	- Une éprouvette graduée.	76
Photo IV.8	- Un récipient.	77
Photo IV.9	- Une règle a arasé.	77
Photo IV.10	- Un entonnoir.	77
Photo IV.11	- Masses volumiques apparent pour le sable.	78
Photo IV.12	- Récipient de graviers (3/8) et (8/15).	83
Photo IV.13	- Appareil de l'essai Los Angeles.	88
Photo IV.14	-Appareil de l'essai Micro Deval .	
	<b>CHAPITRE V : TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE</b>	
Photo V.1	- Moule cubique 15*15*15 cm.	103
Photo V.2	- Un malaxeur à béton.	104
Photo V.3	-Table vibrante.	104
Photo V.4	- Démoulage des éprouvettes.	104
Photo V.5	- Maturation des éprouvettes dans le bac thermostat.	104
Photo V.6	-Conservation à l'air.	105
Photo V.7	- L'appareil d'auscultation dynamique.	109
Photo V.8	-Presse hydraulique de compression.	111

# ***LISTE DES FIGURES***

N° des figures	Intitulé	N° des pages
	<b>CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
Figure I.1	-Structure hétérogène du béton.	4
Figure I.2	- Le schéma de la fabrication du ciment	9
Figure I.3	- Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche	10
Figure I.4	- Fabrication du ciment	11
Figure I.5	- L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment	16
Figure I.6	- Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CP	17
Figure I.7	- différents types des granulats	19
Figure I.8	- Plaques polystyrènes expansés.	23
Figure I.9	- Structure chimique du polystyrène	24
Figure I.10	- Structure alvéolaire du polystyrène	24
Figure I.11	- Billes de polystyrène expansé.	26
	<b>CHAPITRE II : CONTEXTE DU CONTRÔLE NON DESTRUCTIF.</b>	
Figure II.1	-Principe du CND	31
Figure II.2	-Le contrôle par ressuage comporte 3 étapes	34
Figure II.3	-Principe de radiographie	35
Figure II.4	-Principe du contrôle par ultrasons	36
Figure II.5	-Principe de la magnétoscopie	37
Figure II.6	-Principe du CND par courants de Foucault	37
Figure II.7	-Représentation schématique d'ondes transversales vues de profil	39
Figure II.8	-Mesure par ultrasons	41
Figure II.9	-Propagation d'une ultrasonore, (a) onde sphérique, (b) onde plane	43
Figure II.10	-Propagation des ondes longitudinales dans un solide	44
Figure II.11	-Propagation des ondes transversales dans un solide	45
Figure II.12	-Ondes de Lamb	46
Figure II.13	-Mesures en transparence directe	48
Figure II.14	-Mesure en surface	49
Figure II.15	-Mesure en transparence par rayonnement	49
Figure II.16	-Décroissance exponentielle des échos en négligeant la diffraction [GOE 80]	50
Figure II.17	-Diffusion par une hétérogénéité.	51
	<b>CHAPITRE III : LA COMPACTITÉ, LA POROSITÉ ET LA DENSITÉ DES MATÉRIAUX.</b>	
Figure III.1	-Schémas illustrant la notion de compacité.	52
Figure III.2	-Illustration des coefficients d'interaction.	53
Figure III.3	-Exemple de structure poreuse.	55
Figure III.4	-Schématisations d'un milieu poreux.	56

Figure III.5	-Pores ouverts et fermes.	57
Figure III.6	-Porosités d'un volume quelconque.	57
Figure III.7	-Schéma d'un aquifère.	58
Figure III.8	-Schéma d'un réservoir naturel d'hydrocarbures.	58
Figure III.9	-Coupes d'échantillons de grés poreux obtenues à différentes profondeurs.	59
Figure III.10	-Cristaux de quartz, système non poreux (aimablement communiquée par Sperry Rand Research Center).	61
Figure III.11	-Brique, argile frittée, porosité 40 pour cent.	62
Figure III.12	-Gypse hydraté formé de plâtre de Paris et d'eau, porosité 60 pour cent.	62
Figure III.13	-Ciment, hydraté porosité 30 pour cent.	62
Figure III.14	-Volumes unitaires.	63
Figure III.15	-Densité des principales roches sédimentaires (d'après Wohlenberg, 1982).	65
<b>CHAPITRE IV : LES CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX</b>		
Figure IV.1	- les normes soviétiques spécifient de MF des sables.	71
Figure IV.2	- Courbe Granulométrique.	72
Figure IV.3	- Équivalent de sable visuel (ESV).	74
Figure IV.4	- Équivalent de sable avec de piston (ESP).	74
Figure IV.5	- Détermination de la masse volumique absolue du sable.	76
Figure IV.6	- Détermination de la masse volumique absolue.	82
<b>CHAPITRE V: TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES</b>		
Figure V.1	- Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).	97
Figure V.2	-La courbe granulaire.	99
Figure V.3	-Essai d'affaissement.	107
<b>CHAPITRE VI:RESULTATS ET INTERPRÉTATION</b>		
Figure VI.1	-La masse volumique des éprouvettes en fonction de pourcentage de -polystyrène.	114
Figure VI.2	-La masse volumique des éprouvettes en fonction de pourcentage de polystyrène.	114
Figure VI.3	-Temps moyen en fonction de pourcentage de polystyrène.	116
Figure VI.4	-Temps moyen en fonction de pourcentage de polystyrène.	116
Figure VI.5	- La vitesse moyenne ultrasonique en fonction de pourcentage de polystyrène.	117
Figure VI.6	- La vitesse moyenne ultrasonique en fonction de pourcentage de polystyrène.	117
Figure VI.7.	- La vitesse moyenne en fonction de la masse volumique.	118
Figure VI.8	- La vitesse moyenne en fonction de la masse volumique.	118

## *LISTE DES SYMBOLES*

$\phi$	La Compacité Réelle.
L	Longueur du parcours.
$\rho$	Masse volumique du béton.
$\rho_{ab}$	Masse volumique absolue du béton.
$\rho_{app}$	Masse volumique apparent du béton.
p	La porosité.
c	La compacité.
I	Indice de vide.
W	Teneur en eau.
abs	Degré d'absorption.
$\nu$	Coefficient de poisson.
$\mu_s$	Module D'élasticité Transversale.
$\mu$	Coefficient D'absorption.
$\lambda$	Longueur De L'onde Ultrasonore.
$\eta$	Coefficient De Viscosité.
P	La densité du Milieu.
C	La vitesse de son dans le milieu.
V	Vitesse de propagation dans le béton armé, c'est -à- dire la vitesse mesurée.
F <sub>c</sub>	Force Au Moment De La Rupture.
M <sub>f</sub>	Module de finesse du sable.
ESV	Équivalent de sable visuel.
ESP	Équivalent de sable piston.
h	La hauteur.
M	La masse.
V	Le volume.
L	Longueur de l'éprouvette.
K	Constante.
L <sub>A</sub>	Los Angeles.
M <sub>DE</sub>	Micro Deval.
$\gamma$	Coefficient de compacité.
D	Dimension.

$D_{\max}$	Dimension maximale.
C	Masse de ciment.
E	Masses d'eau.
E/C	Rapport eau sur ciment en masse.
G/S	Rapport gravier sur sable en masse.
G	Gravier.
S	Sable.
$V_c$	Volume de ciment.
$V_g$	Volume de gravier.
$V_s$	Volume de sable.
$V_T$	Volume totale.
A	Affaissement.
d	Distance entre faces de l'éprouvette mesurée.
t	Temps de propagation d'ondes.
E	Emetteur.
R	Récepteur.
K	Indice De Serrage.
$R_c$	Résistance à la compression.
S	Section de l'éprouvette.
U	L'amplitude Du Vecteur Déplacement.
$\omega$	La Pulsation De L'onde.
k	Vecteur D'onde.
F	Fréquence De La Vibration.
E	Module De Young.
$\gamma_i$	Compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante.
n	Nombre de classe dans le mélange.
$\beta_i$	Compacité résiduelle de classe i.
$y_j$	Proportion de classe j dans le mélange.
$a_{ij}$	Effet de desserrement exercé par un grain fin j dans un empilement de gros grains i.
$b_{ij}$	Effet de paroi exercé par un gros grain i dans un empilement de grains fins j.
$V_{po}$	Volume de pores ouvert.
$V_{pf}$	Volume de pores fermé.
$V_t$	volume totale.
d	La densité globale.
$d_i$	La densité des minéraux.

$\rho_m$	La densité de la matrice.
$\rho_w$	La densité du fluide.
$\phi$	Porosité totale.
$\rho_{\text{corps}}$	La masse volumique du corp considéré.
$\rho_{\text{ref}}$	La masse volumique du corps de référence.
$\alpha$	Dilatation thermique.
$\lambda$	Conductivité thermique.
$\vartheta$	Température de fusion.
$P$	Pouvoir calorifique.
$\sigma_t$	Contrainte de traction.
$\sigma_c$	Contrainte de compression.
$\sigma$	Résistance à la traction.
$A$	Allongement à la rupture.
$HR$	Humidité relative.
$\tau$	Humidité en œuvre.
$\mu$	Perméabilité à la vapeur.
$M$	Résistance à la diffusion de vapeur.
$C$	Chaleur spécifique.

## *ABRÉVIATIONS*

CPA	Ciment portland artificielle.
CPJ	Ciment portland composé.
CEM I	Ciment portland (CPA).
CEM II	Ciment portland composé (CPJ).
CEM III	Ciment de haut fourneau (CHF).
CEM IV	Ciment pouzzolanique (CPZ).
CEM V	Ciment au laitier et aux (CLC).
CHF	Ciment de haut fourneau.
SiO <sub>2</sub>	Silice.
CaO	Chaux.
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxyde de ferrique.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Alumine.
MgO	Oxyde de magnésium.
C <sub>2</sub> S	Silicate bi calcique (2CaOSiO <sub>2</sub> ).
C <sub>3</sub> A	Aluminate tricalcique (3CaAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).
C <sub>3</sub> S	Silicate tricalcique (alite) (3CaOSiO <sub>2</sub> ).
C <sub>4</sub> AF	Aluminoferrite tétra cacique (4CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ).
Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Magnésium.
Na <sup>+</sup>	Sodium.
Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Calcium.
PSE	Polystyrène expansé.
END	Les essais non destructifs.
CND	Le contrôle non destructif.
NA	Norme algérienne.
NF	Norme Française.
EN	Norme Européenne.

*INTRODUCTION*  
*GÉNÉRALE*

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Dans le domaine du génie civil, les techniques de surveillance et d'auscultation du patrimoine ancien et récent couramment utilisées pour répondre à certaines exigences de sécurité et financières. En effet, les cahiers des charges des marchés ainsi que les normes de sécurité imposent un contrôle de réception des ouvrages neufs et un contrôle de la maintenance des ouvrages en service.

L'une des familles de techniques les plus répandues par sa possibilité de grand rendement et son faible coût pour réaliser ce type d'opération fait appel à un contrôle non destructif (CND)

Ces contrôles non destructifs peuvent utiliser différentes natures de champs (électromagnétique, électrique, mécanique, génie civil...) pour déterminer diverses grandeurs liées aux géométries et la nature, ou à l'état des matériaux. Parmi ces méthodes de CND, les techniques de contrôle par ultrason exploitent la propagation des ondes sonores dans un milieu et permettent de détecter, de localiser différents objets ou forme de structures, et éventuellement de déterminer d'autres caractéristiques (vitesse, temps,...).

Les tests par ultrasons représentent environ le tiers des essais non destructifs de matériaux ou de structures en tout genre, et dans des secteurs d'applications très diversifiés

(Aéronautique, industries des transports, de l'énergie, Génie Civil, etc....). Parmi ces tests, on peut distinguer les contrôles non destructifs (CND) et les évaluations non destructives

(END). Les premiers concernent la détection, la localisation voire le dimensionnement d'inhomogénéités (craquelures, fissures, délaminages, etc....) pouvant constituer des défauts préjudiciables ou pas, selon certains critères d'acceptabilité et de tolérance aux dommages.

Les secondes visent à quantifier certaines propriétés physiques d'un matériau (densité, raideur, perméabilité, etc....) pour s'assurer de sa conformité par rapport à un cahier des charges. Les techniques les plus courantes sont maintenant bien rodées et ont été mises au point pour tester des éléments métalliques, donc isotropes et élastiques. L'emploi de plus en plus répandu des matériaux composites, ou encore le développement des procédés d'assemblages par collage qui suppriment vis, boulons ou rivets, forcent les méthodes de

CND/END à évoluer pour s'adapter aux forts changements des milieux. En effet, la plupart des matériaux composites sont anisotropes (raideur plus forte dans le sens des fibres par exemple), viscoélastiques (notamment les matrices à base de polymères) et hétérogènes (fibres, plis). La propagation des ondes ultrasonores est par conséquent bien différente par rapport aux métaux, et les techniques ultrasonores classiques s'avèrent souvent inadaptées : déviation des faisceaux par l'anisotropie, atténuation par effet thermo viscoélastique, diffraction par les interfaces entre plis, etc.... Il est donc indispensable d'ajuster plusieurs paramètres (fréquence, focalisation, positions

des palpeurs, milieu de couplage, etc....) pour adapter les procédés de CND/END existants ou encore de redéfinir de nouveaux procédés. Pour cela, deux approches sont possibles : la pratique avec de nombreux palpeurs et appareils, des échantillons calibrés, et des campagnes de mesures très appliquées et systématiques, ou la simulation numérique avec un outil fiable et performant qui permette de faire varier à souhait tout paramètre du procédé de CND/END à moindre coût. C'est cette seconde solution qui est proposée dans cet article.

La technique de calcul est basée sur la méthode des éléments finis qui, contrairement aux méthodes analytiques ou semi analytiques, permet de définir des géométries complexes de structures ou de défauts. Pour réduire de manière significative les temps de calculs, les problèmes ne sont pas résolus dans le domaine temporel, mais dans le domaine fréquentiel.

De plus, des régions absorbantes sont employées pour supprimer les réflexions généralement indésirables par les bords du domaine maillé. Les simulations peuvent être effectuées en deux dimensions (problèmes plans ou axisymétriques) ou en trois dimensions, selon les cas de figure. L'anisotropie, la viscoélasticité ou encore l'empilement de plusieurs couches de matériaux sont pris en compte dans les modèles. Après une présentation rapide des principes fondamentaux de la méthode, un cas de validation est présenté pour démontrer l'intérêt et la fiabilité de l'approche choisie. Ensuite, des exemples de simulations d'applications de CND ou d'END sont montrés pour afficher quelques possibilités de la méthode.

Nous commençons dans le premier chapitre par détailler le contexte de contrôle non destructif. Et les conséquences pour le contrôle ultrasonore. Puis la théorie générale de la propagation ultrasonore à travers un matériau de structure hétérogène. Nous expliquons ensuite le phénomène d'atténuation.

Le second chapitre est la compacité, la porosité et densité des matériaux.

Le troisième chapitre traite les caractéristiques des matériaux étudiés

Et la quatrième chapitre est expliquée la préparation des bétons et la méthode de confection des éprouvettes.

Et le Cinquième chapitre est contient protocole expérimentale (comment mesuré le temps et (l'atténuation des ondes ultrasonores).

Le dernier chapitre vise à exploiter ces résultats. Nous commençons ce chapitre en effectuant une synthèse des différents résultats.

*CHAPITRE I*  
*ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE*

**CHAPITRE I : ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE.****I.1.Introduction :**

Le béton est depuis plus de cent ans le matériau le plus utilisé dans la construction. Il est formé par le mélange de constituants très différents : liquide (eau), poudre active (liants hydrauliques), et solide inertes (granulats). On sait que les liants hydrauliques (généralement le ciment) sont des poudres fines constituées de silicates et d'aluminates de chaux anhydres qui s'hydratent en présence d'eau pour donner naissance à un matériau solide, véritable roche artificielle. Ils peuvent agglomérer une forte proportion de matière inerte d'où leur emploi pour la fabrication de mortier et des bétons. Ils sont capables de durcir sous l'eau d'où le nom de « liant hydraulique ».

Louis Vicat, grâce à des recherches commencées en 1812, a montré que pour obtenir des chaux hydrauliques il fallait que la matière première utilisée contienne une proportion d'argile : il donna au rapport argile/chaux le nom « d'indice d'hydraulicité ». Louis Vicat, en préconisant la cuisson d'un mélange en proportion convenable de chaux et d'argile, fut donc à la fois l'inventeur des chaux hydrauliques artificielles et, partant, le père des ciments Portland artificielle (CPA). La première usine à chaux hydraulique artificielle basée sur ce procédé fut construite à Nemours en Seine-et-Marne (France) en 1818. Des observations analogues furent faites à peu près à la même époque en Russie et en Grande-Bretagne.

L'anglais Joseph Aspdin prit d'ailleurs un brevet en 1824 sur la fabrication d'un liant à partir d'un mélange de chaux et d'argile et qu'il appela « ciment Portland », à cause de l'aspect présent par ce liant durci qui rappelait celui de la pierre calcaire de l'île de Portland (venue en 1992). Après 1844 les installations industrielles de fabrication du ciment sont apparues presque simultanément en Angleterre, en France, en Allemagne etc.

Les réactions d'hydratation et le processus de durcissement sont des processus physico-chimiques qui s'accompagnent d'augmentation des résistances et de changements de microstructure donnant naissance à des déformations différées.

## I.2.Le béton:

### I.2.1.Définition :

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 »

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde pour les réalisations des ouvrages de génie civil .Il est caractérisé essentiellement par une bonne résistance à la compression. Ses inconvénients résident dans sa mauvaise résistance à la traction ainsi que sa masse volumique relativement élevée.

La structure du béton est composée de deux principaux constituants : les granulats et la matrice :

✓ Les granulats représentent en moyenne 70% à 80% du volume du béton, on les trouve sous forme de sables, de graviers ou de cailloux. Ils sont considérés comme un renfort mécanique, et ils sont traités comme des inclusions. Les granulats sont obtenus à partir des carrières de roches massives, de gisements alluvionnaires et artificiels tels que les laitiers expansés, les argiles expansées et les schistes expansés. Ils conditionnent la compacité du matériau ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

✓ La matrice liante enrobe et lie les granulats entre eux. Elle est formée d'une structure complexe poreuse source d'échanges internes et externes. Il existe plusieurs types de matrice parmi lesquelles on trouve : la pâte de ciment, la résine et l'hydrocarbure. Un examen plus approfondi, montre que la structure du béton présente un caractère hétérogène sur un domaine de dimensions extrêmement étendu. La figure 1 montre la texture d'un même matériau granulaire à différents grossissements. [1]

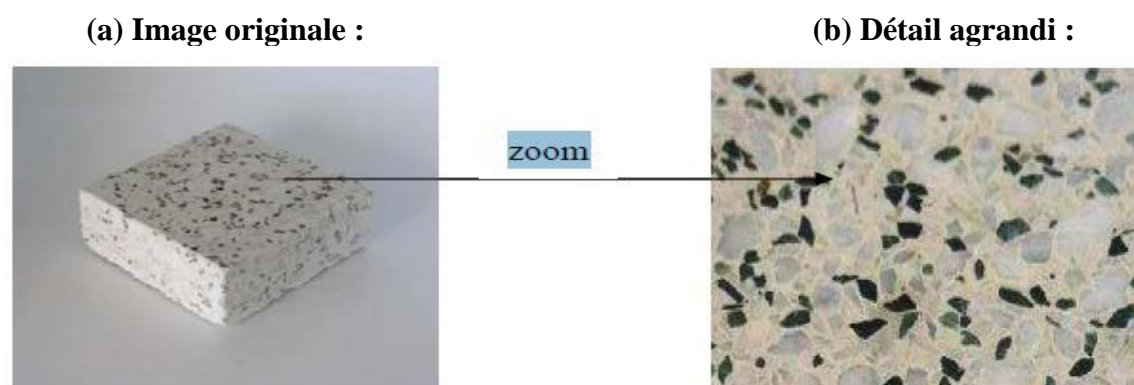


Figure I.1. Structure hétérogène du béton.

**I.2.2. Constituants du béton :**

Il est composé de ciment, de granulats, et d'eau.

**I.2.2.1. Ciment :****I.2.2.1.1. Introduction :**

Le ciment est un produit moulu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450 – 1550 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau et par ce que cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de «pâte de ciment durcissant» sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide [2].

**I.2.2.1.2. Principe de fabrication ciment portland :**

La fabrication de ciment se réduit schématiquement aux trois opérations suivantes:

- préparation du cru
- cuisson
- broyage et conditionnement

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau:

- Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).
- Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- Fabrication du ciment par voie semi-sèche (en partant de la voie sèche).

Le composé de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO<sub>2</sub>), l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), et l'oxyde de fer (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La chaux nécessaire est apportée par des roches calcaires, l'alumine, la silice et l'oxyde de fer par des argiles. Les matériaux se trouvent dans la nature sous forme de calcaire, argile ou marne et contiennent, en plus des oxydes déjà mentionnés, d'autres oxydes et en particulier Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, l'oxyde ferrique.

Le principe de la fabrication du ciment est le suivant: calcaires et argiles sont extraits des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Un mélange d'argile et de calcaire est chauffé. Au début, on provoque le départ de l'eau de mouillage, puis au delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. A partir de 400°C commence la composition en gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et en chaux ( $\text{CaO}$ ), du calcaire qui est le carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ).

Le mélange est porté à 1450-1550 °C, température de fusion. Le liquide ainsi obtenu permet l'obtention des différentes réactions. On suppose que les composants du ciment sont formés de la façon suivante: un partie de  $\text{CaO}$  est retenu par  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en formant une masse liquide.  $\text{SiO}_2$  et  $\text{CaO}$  restant réagissent pour donner le silicate bi calcique dont une partie se transforme en silicate tricalcique dans la mesure où il reste encore du  $\text{CaO}$  non combiné [2].

### **Fabrication par voie humide :**

Cette voie est utilisée depuis longtemps. C'est le procédé le plus ancien, le plus simple mais qui demande le plus d'énergie.

Dans ce procédé, le calcaire et l'argile sont mélangés et broyés finement avec l'eau de façon, à constituer une pâte assez liquide (28 à 42% d'eau). On brasse énergiquement cette pâte dans de grands bassins de 8 à 10 m de diamètre, dans lesquels tourne un manège de herses.

La pâte est ensuite stockée dans de grands bassins de plusieurs milliers de mètres cubes, où elle est continuellement malaxée et donc homogénéisée. Ce mélange est appelé le cru. Des analyses chimiques permettent de contrôler la composition de cette pâte, et d'apporter les corrections nécessaires avant sa cuisson.

La pâte est ensuite envoyée à l'entrée d'un four tournant, chauffé à son extrémité par une flamme intérieure. Un four rotatif légèrement incliné est constitué d'un cylindre d'acier dont la longueur peut atteindre 200 mètres. On distingue à l'intérieure du four plusieurs zones, dont les 3 zones principales sont:

- Zone de séchage.
- Zone de décarbonatation.
- Zone de clinkerisation.

Les parois de la partie supérieure du four (zone de séchage - environ 20% de la longueur du four) sont garnies de chaînes marines afin d'augmenter les échanges caloriques entre la pâte et les parties chaudes du four.

Le clinker à la sortie du four, passe dans des refroidisseurs (trempe du clinker) dont il existe plusieurs types (refroidisseur à grille, à ballonnets). La vitesse de trempe a une influence sur les propriétés du clinker (phase vitreuse).

De toutes façons, quelque soit la méthode de fabrication, à la sortie du four, on a un même clinker qui est encore chaud de environ 600-1200 °C. Il faut broyer celui-ci très finement et très régulièrement avec environ 5% de gypse  $\text{CaSO}_4$  afin de «régulariser» la prise.

Le broyage est une opération délicate et coûteuse, non seulement parce que le clinker est un matériau dur, mais aussi parce que même les meilleurs broyeurs ont des rendements énergétiques déplorables.

Les broyeurs à boulets sont de grands cylindres disposés presque horizontalement, remplis à moitié de boulets d'acier et que l'on fait tourner rapidement autour de leur axe (20t/mn) et le ciment atteint une température élevée (160°C), ce qui nécessite l'arrosage extérieur des broyeurs. On introduit le clinker avec un certain pourcentage de gypse en partie haute et on récupère la poudre en partie basse.

Dans le broyage à circuit ouvert, le clinker ne passe qu'une fois dans le broyage. Dans le broyage en circuit fermé, le clinker passe rapidement dans le broyeur puis à la sortie, est trié dans un cyclone. Le broyage a pour but, d'une part de réduire les grains du clinker en poudre, d'autre part de procéder à l'ajout du gypse (environ 4%) pour réguler quelques propriétés du ciment portland (le temps de prise et de durcissement).

A la sortie du broyeur, le ciment a une température environ de 160 °C et avant d'être transporter vers des silos de stockages, il doit passer au refroidisseur à force centrifuge pour que la température de ciment reste à environ 65 °C [2].

### **Fabrication par voie sèche :**

Les ciments usuels sont fabriqués à partir d'un mélange de calcaire ( $\text{CaCO}_3$ ) environ de 80% et d'argile ( $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ ) environ de 20%. Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être corrigé par apport de bauxite, oxyde de fer ou autres matériaux fournissant le complément d'alumine et de silice requis.

Après avoir finement broyé, la poudre est transportée depuis le silo homogénéisateur jusqu'au four, soit par pompe, soit par aérogليسeur.

Les fours sont constitués de deux parties:

- Un four vertical fixe, préchauffeur (cyclones échangeurs de chaleur).
- Un four rotatif.

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ) et son eau. La poudre pénètre ensuite dans un four rotatif analogue à celui utilisé dans la voie humide, mais beaucoup plus court.

La méthode de fabrication par voie sèche pose aux fabricants d'importants problèmes techniques:

1. La ségrégation possible entre argile et calcaire dans les préchauffeurs. En effet, le système utilisé semble être néfaste et en fait, est utilisé ailleurs, pour trier des particules. Dans le cas de la fabrication des ciments, il n'en est rien. La poudre reste homogène et ceci peut s'expliquer par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité ( $2,70 \text{ g/cm}^3$ ). De plus, le matériel a été conçu dans cet esprit et toutes les précautions ont été prises.

2. Le problème des poussières. Ce problème est rendu d'autant plus aigu, que les pouvoirs publics, très sensibilisés par les problèmes de nuisance, imposent des conditions draconiennes. Ceci oblige les fabricants à installer des dépoussiéreurs, ce qui augmente considérablement les investissements de la cimenterie. Les dépoussiéreurs sont constitués de grilles de fils métalliques portés à haute tension et sur lesquels viennent se fixer des grains de poussière ionisée. Ces grains de poussière s'agglomèrent et sous l'action de vibreurs qui agitent les fils retombent au fond du dépoussiéreur où ils sont récupérés et renvoyés dans le four. En dehors des pannes, ces appareils ont des rendements de l'ordre de 99%, mais absorbent une part importante du capital d'équipement de la cimenterie.

Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Nous avons vu comment il pouvait être résolu au moyen d'une préhomogénéisation puis d'une homogénéisation [2].

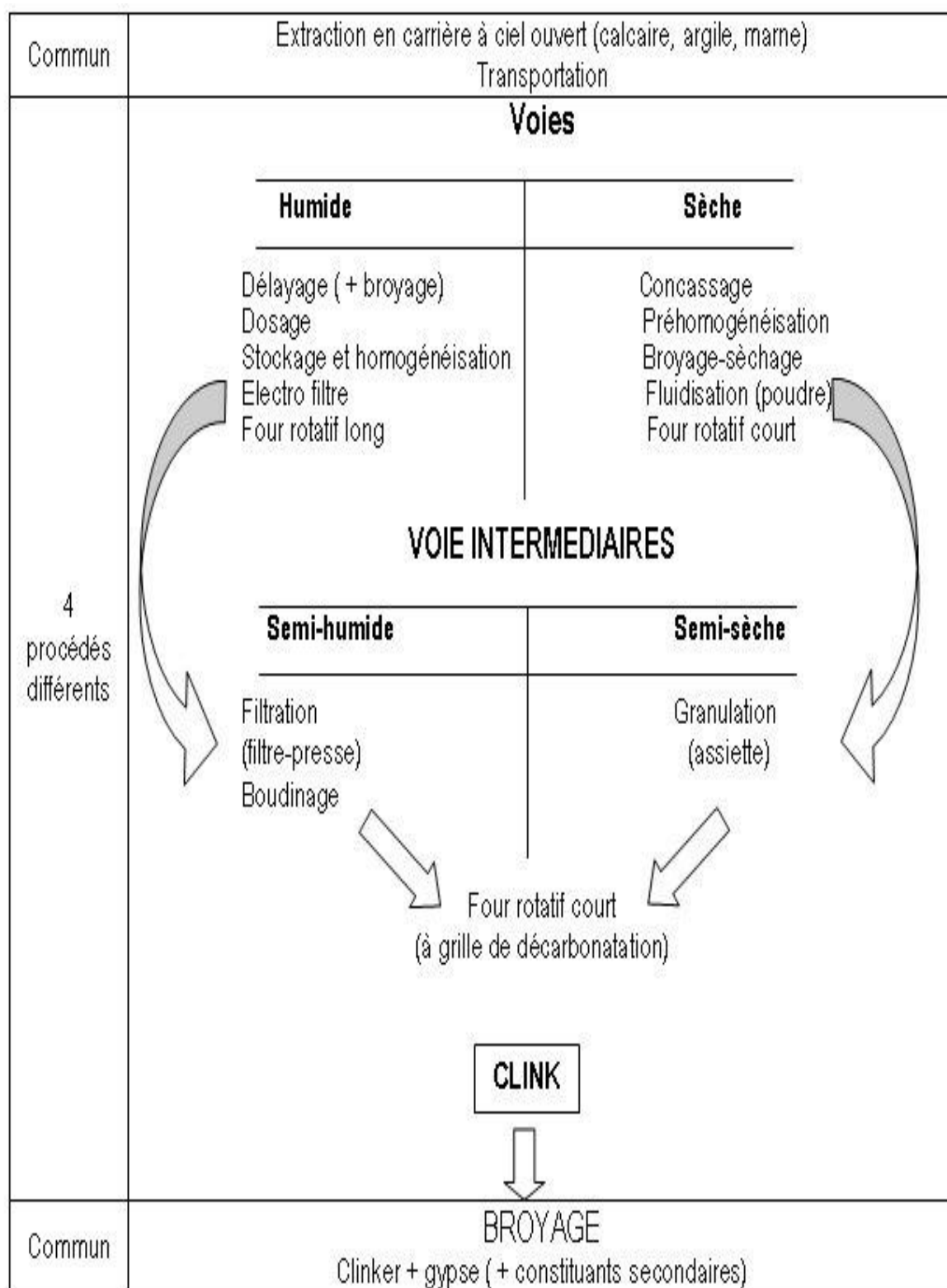


Figure I.2. Le schéma de la fabrication du ciment. [2]

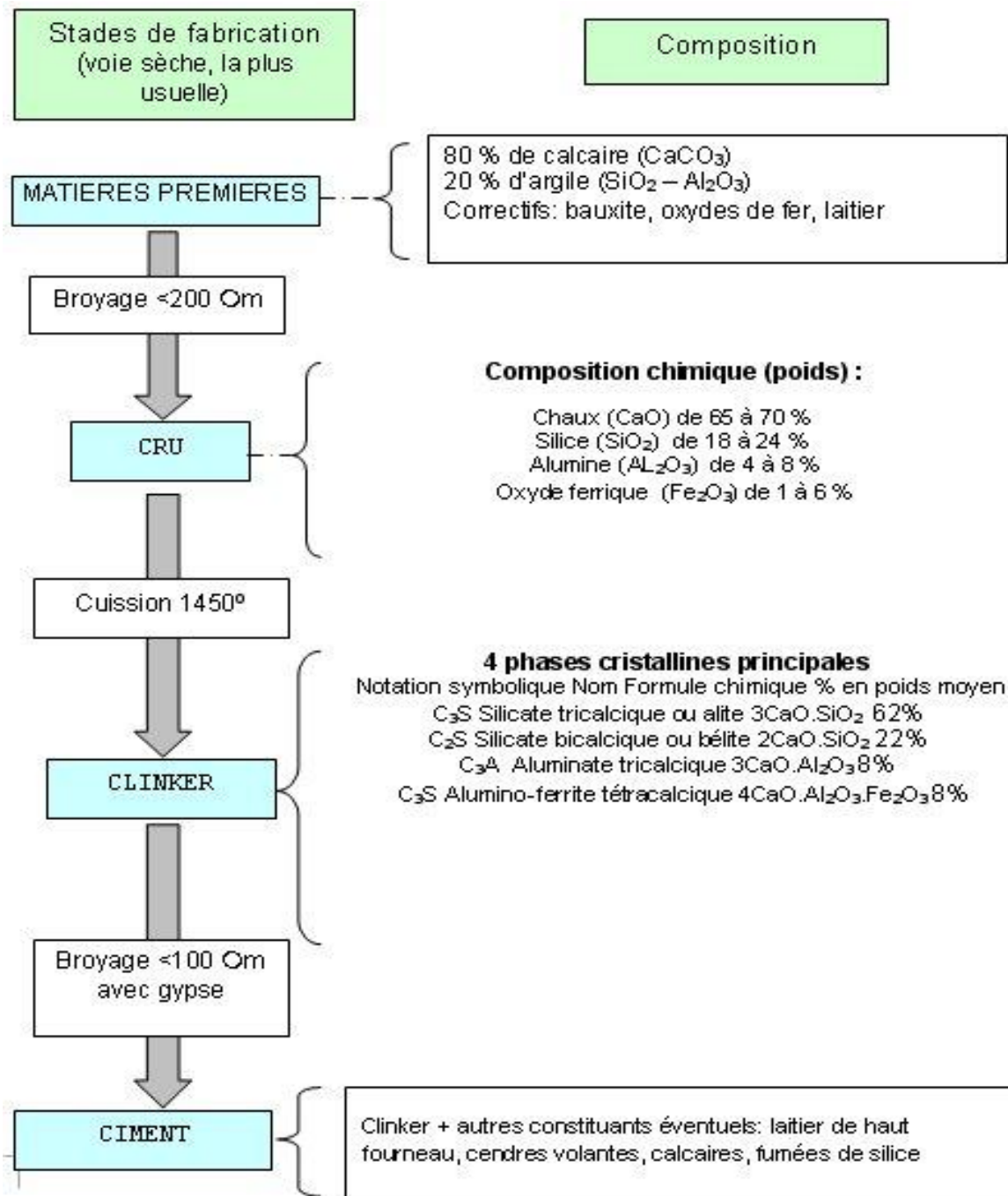


Figure I.3. Le schéma de la fabrication du ciment par voie sèche. [2]

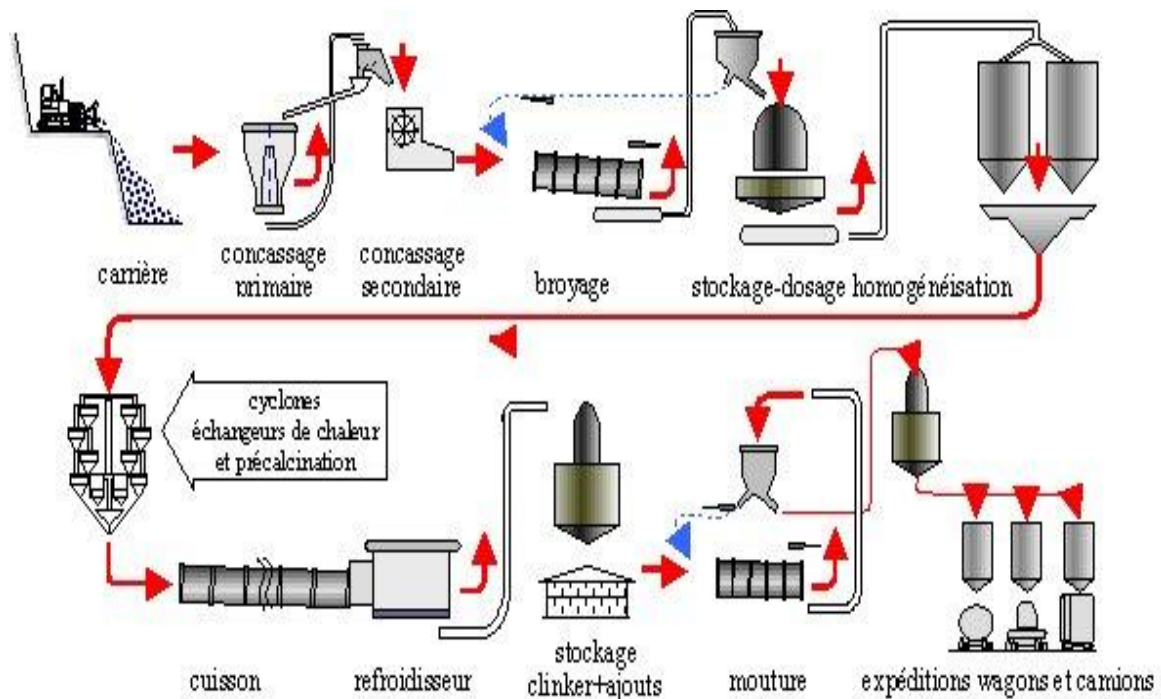


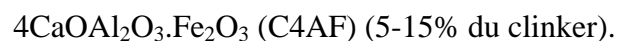
Figure I.4.Fabrication du ciment. [2]

### I.2.2.1.3.Constituants principaux et additions :

#### ➤ Constituants du clinker :

Les principaux composants anhydres obtenus lors du refroidissement rapide du clinker sont:

- Le silicate tricalcique  $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) (50-70% du clinker).
- Le silicate bicalcique  $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ) (10-30% du clinker).
- L'aluminate tricalcique  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ) (2-15% du clinker).
- L'alumino-ferrite tétracalcique (Ferro-aluminate tétracalcique)



Le clinker contient encore en faibles quantités, sous forme de solution solide ou pris dans des combinaisons complexes, des alcalis ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ), de la magnésie ( $\text{MgO}$ ), diverses traces de métaux.

La teneur en alcalis et magnésie doit rester faible, car ces matières peuvent influencer défavorablement la stabilité du ciment durci.

A l'aide du microscope, on peut distinguer la structure minéralogique du clinker en trois phases, auxquelles les chercheurs donnèrent les noms suivants:

- A = alite (phase cristallisée), se présente sous la forme de cristaux polygonaux assez grands (grains anguleux foncés) de l'ordre de  $50\mu$ .
- B = bélite (phase vitreuse), se trouve sous forme impure dans le clinker (grains légèrement arrondis et rayés).

- C = célide (phase vitreuse légèrement foncée et claire), se trouve dans le clinker sous forme impure et de phase vitreuse [2].

### ➤ Les autres constituants des ciments :

Le ciment portland est composé de clinker moulu auquel on ajoute une quantité de gypse, destiné à régulariser la prise. Pour modifier les propriétés du ciment, on ajoute les autres constituants associés au clinker grâce à leurs caractéristiques chimiques ou physiques.

Les constituants les plus utilisés sont:

#### **Calcaires:**

Les calcaires sont considérés comme un des constituants principaux du ciment. Ils doivent présenter une proportion de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieure à 75% en masse [2].

#### **Laitier granulé de haut fourneau:**

Le laitier est un sous-produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés hydrauliques. Il est obtenu par refroidissement rapide (trempe) de certaines scories fondues provenant de la fusion du minerai de fer dans un haut fourneau [2].

#### **Cendres volantes (V ou W):**

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue:

- Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques;
- Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques [2].

#### **Schistes calcinés:**

Ce sont des schistes que l'on porte à une température d'environ 800 °C dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques [2].

#### **Fumée de silice:**

Les fumées de silices sont un sous-produit de l'industrie du silicium et de ses alliages. Elles sont formées de particules sphériques de très faible diamètre (de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$ ). Pour entrer dans la composition d'un ciment en tant que constituant principal, elles doivent être présentes pour au moins 85 % (en masse). Les fumées de silices ont des propriétés pouzzolaniques [2].

**Fillers:**

Ce sont des “constituants secondaires” des ciments, donc ils ne peuvent jamais excéder 5 % en masse dans la composition du ciment. Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles qui agissent par leur granulométrie sur les propriétés physiques des liants (maniabilité, pouvoir de rétention d’eau)[2].

**I.2.2.1.4. Les principales catégories de ciment :**

Les ciments peuvent être classés en fonction de leur composition et de leur résistance normale.

**I.2.2.1.5. Classification des ciments en fonction de leur composition :**

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P15-301[3] et EN 197-1[4] .

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

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

La proportion (en masse) des différents constituants est indiquée dans le tableau. I.1. Les constituants marqués d’une étoile (\*) sont considérés comme constituants secondaires pour le type de ciment concerné; leur total ne doit pas dépasser 5%. (Les fillers sont considérés comme des constituants secondaires)[2].

**I.2.2.1.6. Classification des ciments en fonction de leur résistance normale:**

Trois classes sont définies en fonction de la résistance normale à 28 jours; des sous classes “R” sont associées à ces 3 classes principales pour désigner des ciments dont les résistances au jeune âge sont élevées. Ces classes sont notées, classe 32,5 classe 42,5 classe 52,5. Elles doivent respecter les spécifications et valeurs garanties du tableau. I.2. Les valeurs entre parenthèses sont les valeurs garanties lorsqu’elles peuvent être inférieures aux valeurs spécifiées [2].

Tableau. I.1.Désignation des différents types de ciment en fonction de leur composition. [2]

	Cim. Port- land	Ciment Portland composé		Ciment de haut fourneau			Ciment pozzolanique		Ciment au laitier et aux cendres	
	CPA- CEM I	CPJ- CEM II/A	CPJ- CEM II/B	CHF- CEM III/A	CHF- CEM III/B	CLK- CEM III/C	CPZ- CEM IV/A	CPZ- CEM IV/B	CLC- CEM V/A	CLC- CEM V/B
<b>Clinker (K)</b>	/95%	/80% ≤94%	/65% ≤79%	/35% ≤64%	/20% ≤34%	/5% ≤19%	/65% ≤90%	/45% ≤64%	/40% ≤64%	/20% ≤39%
<b>Laitier (S)</b>	*	6%≤	21%≤	/36% ≤65%	/66% ≤80%	/81% ≤95%	*	*	/18% ≤30%	/31% ≤50%
<b>Pouzzolanes (Z)</b>	*	total ≤20%  (fumée de silice ≤10%)	total ≤35%  (fumée de silice ≤10%)	*	*	*	10% ≤ total ≤35% (fumée ≤10%)	36% ≤ total ≤55% (fumée ≤10%)	18%≤ total ≤30%	31%≤ total ≤50%
<b>Cendre siliceuses (V)</b>	*			*	*	*				
<b>Fumée de silice (D)</b>	*			*	*	*			*	*
<b>Cendres calcaires (W)</b>	*			*	*	*	*	*	*	*
<b>Schistes (T)</b>	*			*	*	*	*	*	*	*
<b>Calcaires (L)</b>	*			*	*	*	*	*	*	*
<b>Fillers (F)</b>	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Tableau. I.2.Spécification et valeurs garanties en fonction de la classe. [2]

Classe	Résistance à la compression (MPa) EN 196-1				Retrait à 28 jours	Début de prise	Stabilité
	au jeune âge		à 28 jours		P 15-433	EN 196-3	EN 196-3
	2 jours	7 jours	mini.	maxi.	(µm/m)	(min)	(min)
<b>32,5</b>		(17,5)	/32,5 (30)	≤52,5	≤800	/90	≤10
<b>32,5 R</b>	/13,5 (12)	/	/32,5 (30)	≤52,5	≤1 000	/90	≤10
<b>42,5</b>	/12,5 (10)		/42,5 (40)	≤62,5	≤1 000	/60	≤10
<b>42,5 R</b>	/20 (18)		/42,5 (40)	≤62,5	≤1 000	/60	≤10
<b>52,5</b>	/20 (18)		/52,5 (50)			/60	≤10
<b>52,5 R</b>	/30 (28)		/52,5 (50)			/60	≤10

Tableau. I.3.Limite des classes et sous classes de résistances (nouvelle norme AFNOR). [2]

Désignation de la classe	Sous classe éventuelle	Résistance à la compression		
		à 2 jours minimaux	à 28 jours minimales	à 28 jours maximales
350	-	-	250	450
450	-	-	350	550
	R (rapide)	150	350	550
550	-	-	450	650
	R (rapide)	225	450	650
THR Très hautes performances	-	300	550	-

### I.2.2.1.7.Évolution physico-chimique de la pâte de ciment:

En gâchant le ciment avec l'eau, on obtient une pâte dans laquelle l'eau entoure chaque grain de ciment en formant un réseau capillaire. Les composés anhydres du ciment sont alors attaqués en surface par l'eau pour produire des composés hydratés. Dans le cas des silicates de calcium  $C_3S$  et  $C_2S$ , la chaux hydratée se dissout et il se dépose des cristaux de  $Ca(OH)_2$  en plaquettes hexagones alors que les silicates de calcium hydratés forment un gel composé de fines aiguilles à la surface du ciment. Ces aiguilles se développent en dimension et en nombre tout en réduisant les interstices capillaires entre les grains. Quand les aiguilles entre les grains de ciment se rapprochent, la pâte devient plus raide. Cette rigidité est au début faible et peut encore être facilement détruite mécaniquement. C'est le début de la prise.

Après quelques heures, les interstices capillaires sont partiellement comblés par le gel. La pâte de ciment acquiert une certaine résistance. C'est le durcissement qui commence. La résistance continue à croître à mesure que le gel devient plus compact, d'une part, parce qu'il y a un accroissement de la cohésion entre les aiguilles et accroissement du feutrage des aiguilles, d'autre part, parce qu'il se formerait des joints de soudure entre les aiguilles de tobermolite des divers grains de ciment.

Dans les pâtes de ciment durcies, il reste de ce fait toujours des grains de ciment non hydratés. L'hydratation des grains de ciment continue non seulement des mois, mais des années durant, pour autant que le gel soit entouré d'eau, car le gel de tobermolite ne peut se former qu'en présence d'eau [2].

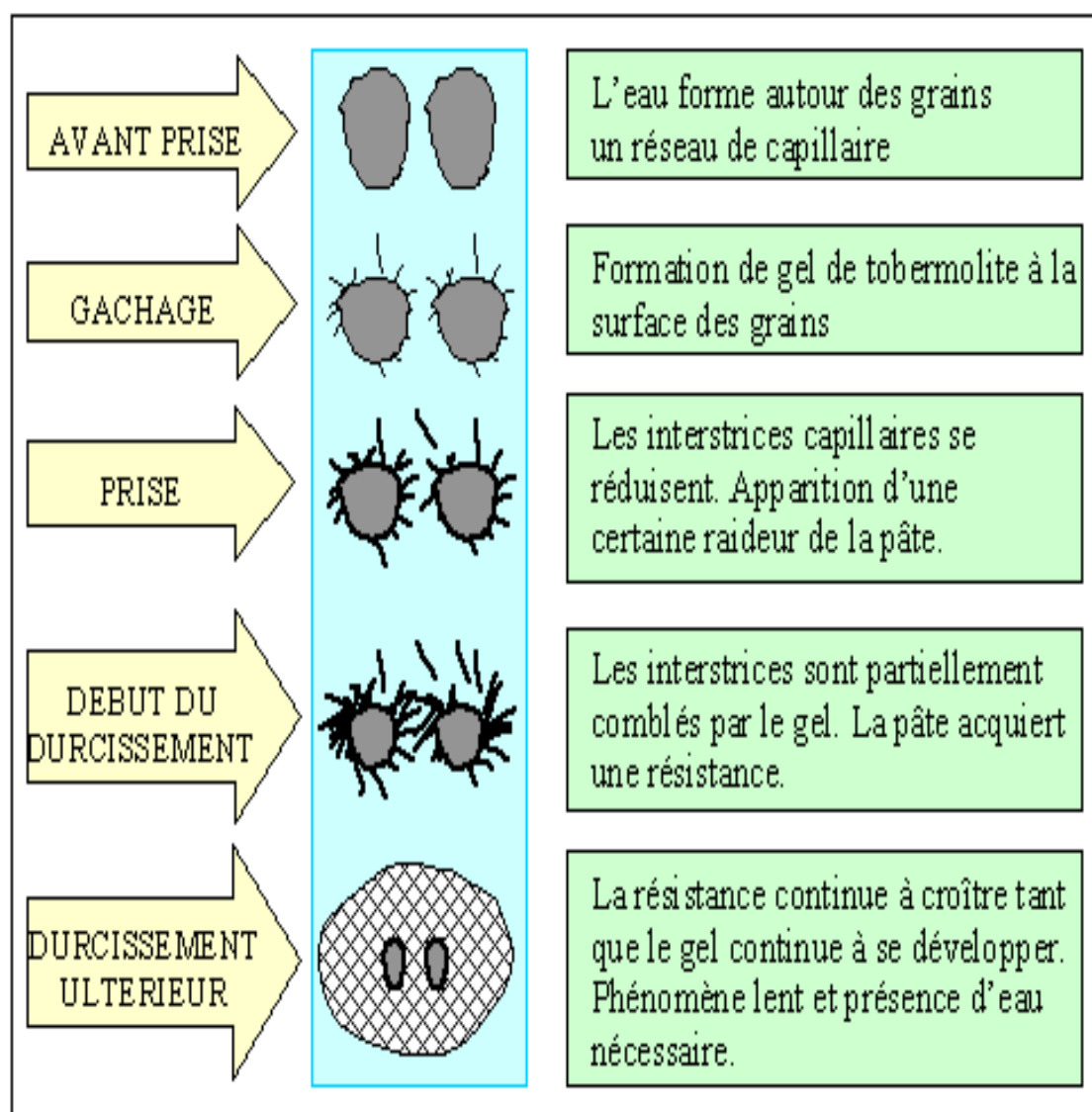
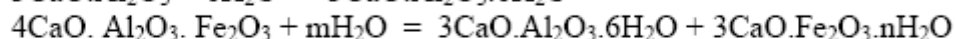
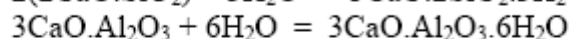
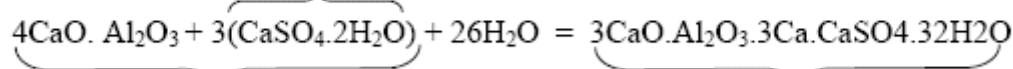


Figure I.5.L'évolution physico-chimique de la pâte de ciment. [2]

### Quelques réactions chimiques importantes:



**GYPSE**



**CIMENT PORTLAND**

**HYDROSULFO-ALUMINATE CALCIQUE**

Les réactions d'hydratation du ciment Portland sont très complexes. Nous ne considérons que les quelques-unes utiles à connaître pour mieux comprendre les propriétés des ciments portlands [2].

**I.2.2.1.8. Chaleur d'hydratation :**

Le phénomène de prise du ciment s'accompagne d'une réaction exothermique dont l'importance dépend de différents paramètres, en particulier:

- la finesse de mouture: plus le ciment est broyé fin, plus la chaleur d'hydratation est élevée
- la nature des constituants: les ciments CPA comportant presque exclusivement du clinker dégagent plus de chaleur que des ciments avec constituants secondaires
- la nature minéralogique du clinker: plus les teneurs en aluminat tricalcique ( $C_3A$ ) et silicate tricalcique ( $C_3A$  et  $C_3S$ ) sont élevées, plus la chaleur d'hydratation est forte
- la température extérieure [2].

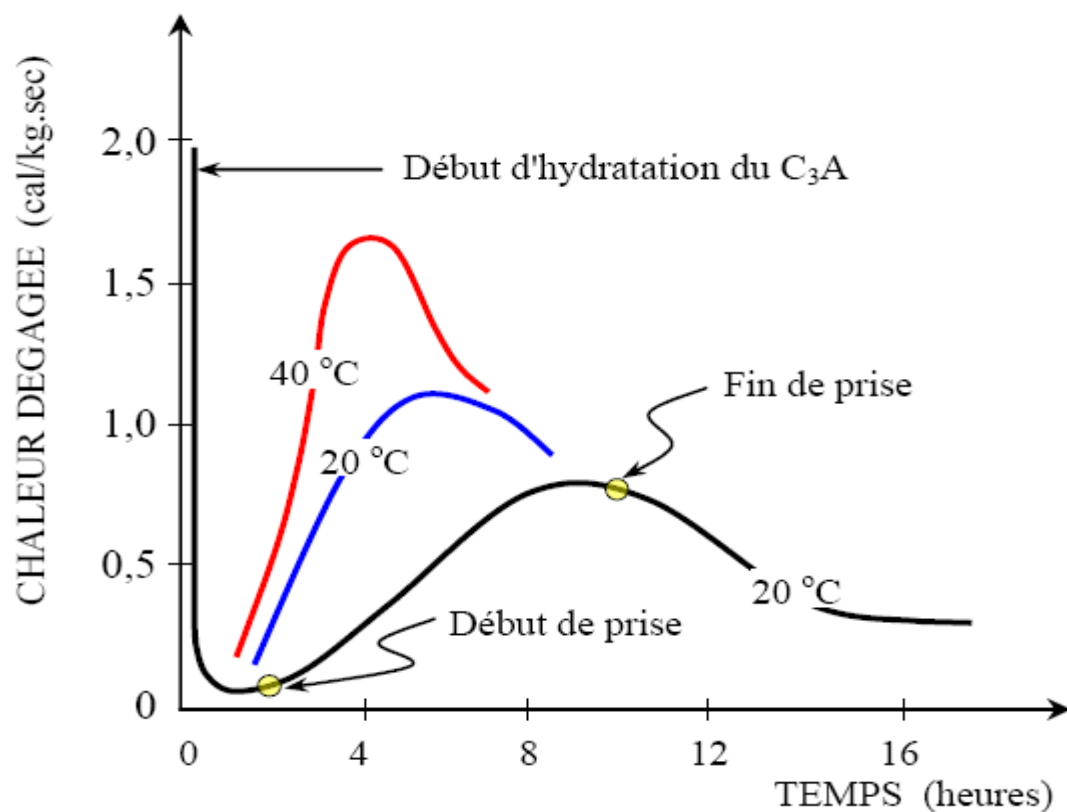


Figure I.6. Chaleur dégagée lors de l'hydratation du CP. [2]

**I.2.2.2.Granulats :****I.2.2.2.1.Définition :**

Le granulat est constituant d'un ensemble de grains minéraux qui selon sa dimension (comprise entre 0 et 125 mm) se situe dans l'une des 5 familles suivantes:

- Fillers
- Sables, sablons
- Graves
- Gravillons, ballast
- Enchements.

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sable et de graviers d'origines alluvionnaires terrestres ou marines, en concassant des roches massives (calcaire ou éruptives) ou encore par le recyclage des produits tels que les matériaux de démolition. Leur nature, leur forme et leur caractéristique variant en fonction des gisements et des techniques de production.

La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifiques en termes de résistance mécanique, tenue au gel et des propriétés physique-chimiques.

Les granulats les plus usuels pour la fabrication des bétons sont élaborés à partir de roche d'origine alluvionnaire (granulats roulés ou semi concassés), ou à partir des roches massives (granulats concassé). La taille des granulats répond à des critères granulométriques précis. Les granulats sont classés en fonction de leur granularité (distribution dimensionnelle des grains), déterminée par analyse granulométrique à l'aide de tamis.

Le granulat est désigné par le couple d/D avec

- d: dimension inférieur du granulat.
- D: dimension supérieur du granulat.

**Tableau. I.4.les différents classes des granulats.**

Types	Dimension (mm)
Fillers 0/D	$D \leq 2$
Sables 0/D	$1 < D \leq 6,3$
Gravillons 0/D	$d > 1, D \leq 31,5$
Cailloux d/D	$d > 20, D \leq 80$
Graviers	$6.3 \leq D \leq 80$



Figure I.7. différents types des granulats.

#### **I.2.2.2.2. Différents types de granulats :**

On peut citer plusieurs types en fonction de plusieurs critères concernant le granulat lui-même.

##### **I.2.2.2.2.1. En fonction de leur masse volumique réelle :**

###### **a-Granulats légers :**

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est inférieure à  $2 \text{ t/m}^3$ , comme les argiles, les schistes, les laitiers expansés ou encore les pouzzolanes. Ils sont destinés à la préparation des bétons légers.

###### **b-Granulats courants :**

Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est entre 2 et  $3 \text{ t/m}^3$ .

###### **c-Granulats lourds :**

Comme les matériaux naturels, alluvionnaires (silex, calcaire dur silico-calcaire) de densité entre 2,5 et 2,7 éruptifs ou sédimentaires (grès, porphyres, diorite, basaltes, ...etc.) de densité entre 2,6 et 3 Ce sont les granulats dont la masse volumique réelle est supérieure à  $3 \text{ t/m}^3$ .

Ils sont essentiellement employés pour la confection des bétons lourds utilisés pour construire des Ouvrages nécessitant une protection biologique contre le rayonnement.

On utilise en particulier les barytines, les magnétites qui ont une densité entre 3,4 et 5,1 aussi les riblons et les grenailles de fonte qui ont une densité entre 7,6 et 7,8 [5].

##### **I.2.2.2.2.2. En fonction de leur origine :**

###### **a- Les granulats naturels :**

Ce sont des matériaux purement naturels, ne subissant aucun traitement autre que mécanique tel qu'extraction, concassage, broyage, criblage, lavage...etc.

**b- Les granulats artificiels :**

Ce sont les granulats qui proviennent de la transformation thermique de roches, de minerais ou de sous produits industriels (laitiers, scories), ou encore de la démolition d'ouvrages ou de bâtiments divers en béton souvent appelés granulats recyclés.

**I.2.2.2.3.En fonction de la forme de leurs grains :****a- Les granulats concassés:**

Ce sont des granulats provenant du concassage des pierres et dont les grains ont une certaine angularité. Ils sont issus du concassage des roches de porphyres, grés, calcaires, quartzites, de galets concassés et de laitiers.

**b- Les granulats roulés :**

Ils représentent les granulats ayant subis une altération naturelle mécanique due à l'eau, au vent, à l'usure réciproque des granulats lors de leur transportation dans la nature. Il résulte que plus de 90% des surfaces des grains sont arrondies et de provenance alluvionnaire.

**I.2.2.2.3.Classification des granulats :**

On trie les granulats par dimension au moyen de tamis (mailles carrées) et de passoires (trous circulaires) et on désigne une classe de granulats par un ou deux chiffres. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum  $D$  exprimé en mm; si l'on donne deux chiffres, le premier désigne le diamètre minimum  $d$ , des grains et le deuxième le diamètre maximum  $D$ .

Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe  $d/D$ . Lorsque  $d$  est inférieur à 2 mm, le granulat est désigné  $0/D$ .

Il existe cinq classes granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes  $d$  et  $D$  des granulats rencontrées (Norme NFP18-101):

- Les fines       $0/D$  avec  $D \leq 0,08$  mm,
- Les sables       $0/D$  avec  $D \leq 6,3$  mm,
- Les gravillons     $d/D$  avec  $d \geq 2$  mm et  $D \leq 31,5$  mm,
- Les cailloux       $d/D$  avec  $d \geq 20$  mm et  $D \leq 80$  mm,
- Les graves       $d/D$  avec  $d \geq 6,3$  mm et  $D \leq 80$  mm,

**I.2.2.2.4.Gravier:**

On appelle gravier l'accumulation des grains de 5 à 70 mm provenant de la distraction naturelle des roches tandis que la pierre concasser par broyage des roches massives, de gravier pierre artificiel, en morceaux dont les dimensions varient de: 5 à 70mm.

#### I.2.2.2.4.1. Granularité de gravier :

La granularité conditionne la porosité de mélange, si tous les grains, ont une même grosseur, ont aurais une porosité maximale, donc pour avoir un mélange de volume des vides minimum il faut une composition granulométrique des grains de différents dimensions doit se situer dans la limites appelées (fuseaux de spécification).

**Tableau. I.5. Refus cumulés sur tamis. [5]**

Tamis	limite de refus cumulé (%)
$D_{min}$	90-100
$D_{max}$	0-10
$^{1/2}(D_{min} + D_{max})$	40-70
$5/4 D_{max}$	0

#### I.2.2.2.4.2. Absorption d'eau:

Les graviers sont plus au moins poreux, les graviers absorbent de l'eau de pluie est devient humide, il faut donc prendre en compte cette humidité lors de la détermination de la composition de béton, si non on aura une quantité d'eau de gâchage supplémentaire qui entraînent une diminution de la résistance du béton.

#### I.2.2.3. Sable:

Le sable est une masse meuble de matières minérales inorganisées, finement granuleuses (0,08 à 5,00 mm), habituellement composées de quartz (silice), et d'une petite proportion de mica, de feldspath, de magnétite et autres minéraux durs c'est le résultat de l'érosion, dégradation et abrasion des roches par des processus chimiques et mécaniques quand les grains viennent de se former, ils sont Habituellement anguleux lettrés pointus par la suite sous l'action du vent et de l'eau ils s'usent, s'arrondissent et deviennent de plus en plus petits.

Le sable est un élément très important dans la constitution des bétons et c'est généralement par la médiocre qualité du sable que périssent les bétons.

##### I.2.2.3.1. classification de sable:

##### a. suivant leurs grosseurs:

- Sable fin..... 0,08 à 0,315 mm.
- Sable moyen..... 0,315 à 2,00 mm.
- Sable gros..... 2,00 à 5,00 mm.

##### b. Suivant leur provenance:

- Sable de rivière: absence de grains fins.
- Sable de dunes : uniformité et prédominance de grain fin.
- Sable de plaines ou d'alluvions: absence de gros grain.

- Sable résidus de concassage : prédominance de gros grain et présence de farines, ou fines ou fillers.
- Sable de mer.

#### **I.2.2.3.2. Rôle du sable dans le béton :**

Dans le béton le sable occupe presque 1/4 de son volume par conséquent la qualité du sable influant considérablement sur la qualité du béton. Il remplit avec le ciment et l'eau tous les vides entre les grains de gravier, décidant ainsi la structure compacte du béton, d'autre part de coût de revient, puisqu'il est toujours moins cher que le ciment.

#### **I.2.2.3.3. Caractéristique des sables :**

La propriété des sables se déterminent par différentes méthodes parmi elles : la méthode de l'équivalent de sable (Es). L'emploi d'un sable souillé conduit à une baisse de la résistance et une augmentation de retrait dans béton. La dureté des grains et enfin un facteur important pour l'obtention d'un béton convenable.

Les sables siliceux sont les meilleurs, les sables calcaires sont rarement assez durs pour assurer au béton une bonne résistance.

Notons que les sables peuvent contenir une quantité d'eau importante jusqu'à 200 Litre et plus par  $\text{lm}^3$ , pour cela lors de détermination de dosage en eau il faut tenir compte de cette teneur en eau du sable, ou bien il faut sécher le sable en utilise l'étuve ou bien naturellement.

#### **I.2.2.4. eau de gâchage :**

L'eau de gâchage et la quantité d'eau totale ajoutée au mélange sec de béton elle est nécessaire pour l'hydratation du liant, le mouillage des granulats et la facilité de mise en place du béton. Cette eau a une grande importance, elle est soumise à certaines exigences est à même fait l'objet d'une norme (NF18-303) [6]. On conçoit donc, en premier lieu, que les impuretés nocives pour les granulats ne doivent pas être apportées par l'eau de gâchage.

##### **I.2.2.4.1. Caractéristiques physiques :**

L'eau de gâchage des bétons doit être propre, elle ne doit pas contenir de matières en suspension au-delà de certaines valeurs permises.

Les tolérances réglementaires sont les suivant :

- 2g/l pour les bétons type A et type B.
- 5g/l pour le béton type C.

Les matières en suspension n'ont pas la même nocivité.

- béton type A: béton de haute qualité à résistance élevée.
- béton type B : béton à faible perméabilité.
- béton type C: béton à faible résistance peut au non armé.

**I.2.2.4.2. Caractéristiques chimiques :**

L'eau de gâchage des bétons ne doit pas contenir de sels dissous au – delà de:

- 15g/1 pour les bétons type A et type B.
- 30g/1 pour le béton type C.

L'eau de mer est admise pour le gâchage des bétons du type C, sauf certaines prescriptions spéciales. L'eau douteuse doit être analysée chimiquement au laboratoire spécialisé.

**I.2.2.5. Le polystyrène :**

Le polystyrène est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique du béton et l'emballage des produits industriels ou alimentaires.



**Figure I.8. Plaques polystyrènes expansés.**

**I.2.2.5.1. Origine :**

Des plaques en polystyrène expansé sont utilisées pour la germination de graines, l'élevage de plants ou les cultures hors-sol. Le polystyrène expansé est également fréquemment utilisé pour l'emballage de produits fragiles (alimentaire, colisage...).

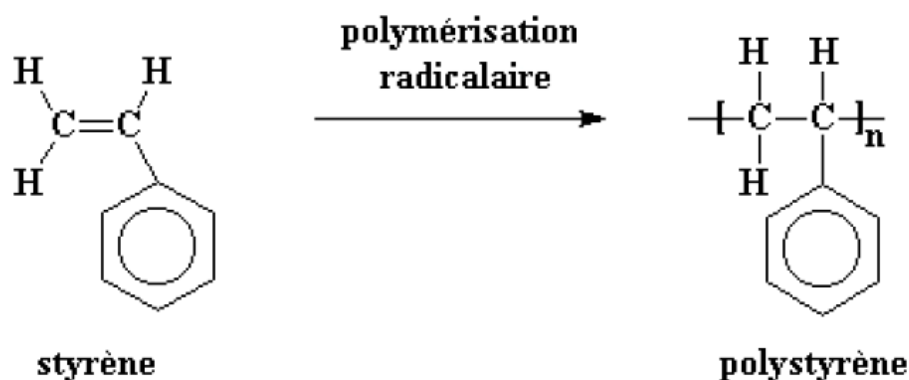
**I.2.2.5.2. Nature :**

Le polystyrène expansé (PSE) est une matière plastique. C'est un matériau extrêmement léger, il contient 98% d'air. Il est un excellent isolant thermique. Il est composé de petites billes blanches compressées et moulées, donc agglomérées les unes aux autres. Le PSE issu des cultures sous serre est en général souillé de terre une fois utilisé. Le PSE issu des emballages est généralement propre. Dans tous les cas, il reste un déchet non dangereux.

**I.2.2.5.3. Composition chimique :**

Le polystyrène est un polymère thermoplastique linéaire à squelette aliphatique obtenu par polymérisation du motif homopolymère de styrène (figure I.7.). Structurellement, c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés, avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone.

[7]

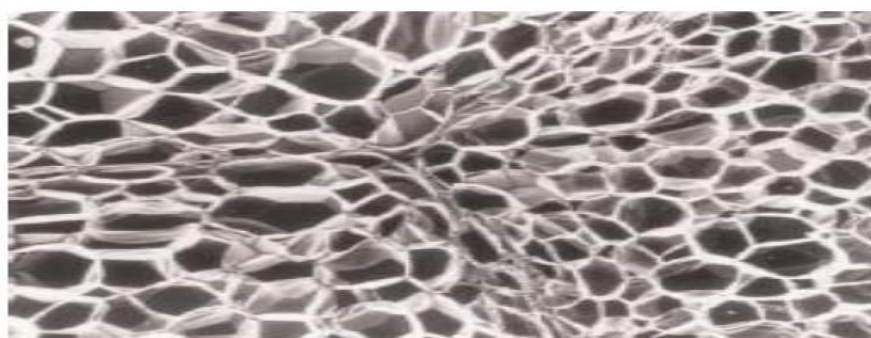


**Figure I.9. Structure chimique du polystyrène.**

Le produit de base servant à la fabrication du polystyrène expansé est obtenu sous forme de petites perles blanches, chimiquement très stable, et doué de propriétés thermoplastiques. Suivant les applications, on distingue trois types différents par leur granulométrie et leurs propriétés :

- Ceux destinés aux fabrications courantes, les perles sphériques reformant un « porogène » (ou agent gonflant) : le pentane,
- Ceux destinés à la fabrication de produit « difficilement inflammable » ou auto- extinguibles », cette propriété n'étant acquise qu'après un certain temps de stockage en raison de la teneur en pentane,
- Ceux destinés à la fabrication de produits expansés résistant aux essences et huiles minérales exemptes d'hydrocarbures aromatiques.

La structure du polystyrène expansé (PES) comporte des soudures inter perles, la taille des cellules se situe habituellement entre 60 et 200  $\mu\text{m}$  (figure I.8.).



**Figure I.10. Structure alvéolaire du polystyrène.**

**I.2.2.5.4. Fabrication du polystyrène expansé :**

La transformation du polystyrène en élément isolant (polystyrène expansé) comprend les étapes suivantes :

**➤ Pré- expansion :**

Le produit de base subit une phase de pré- expansion. Celle- ci s'effectue dans un prémousseur muni d'une arrivée de vapeur, d'une arrivée d'air et d'un système d'introduction des perles brutes. L'opération est faite en continu à une vitesse de 250 Kg/ heure et à une température de 97 °C. Le produit obtenu a une densité comprise entre 17 et 18 Kg/ m<sup>3</sup>.

**➤ Stockage intermédiaire :**

Les perles ainsi pré- expansées sont ensuite stockées dans des silos pour y subir un « mûrissement » permettant la mise en équilibre des pressions entre les cellules dans lesquelles le porogène a en grande partie disparu sous l'action de la température et le milieu extérieur.

**➤ Seconde expansion :**

Elle est faite selon la même méthode que précédemment mais dans des appareils de volume plus important. C'est au cours de cette opération que les perles sont façonnées suivant le produit que l'on désire obtenir.

**I.2.2.5.5. Propriétés du polystyrène :**

Les propriétés remarquables du polystyrène sont notamment :

- Sa faible masse volumique située généralement, suivant les applications, entre 10 et 30 kg/m<sup>3</sup>,
- Son pouvoir isolant thermique,
- Ses excellentes propriétés mécaniques (résistance en compression, capacité d'amortissement des chocs),
- Son insensibilité de mise en forme (moulage, découpage, ...).

**I.2.2.5.6. Billes de polystyrène :**

Les billes de polystyrène sont obtenues par expansion de billes pleines. L'expansion est arrêtée lorsque la granulométrie souhaitée est atteinte. Elles sont parfaitement sphériques, La coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique d'une part son extrême légèreté et d'autre part sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et Yamauchi [8] ont montré que des billes de polystyrène immergées dans l'eau pendant un mois n'ont pas absorbé d'eau. Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface.



**Figure I.11. Billes de polystyrène expansé.**

#### **I.2.2.5.7 Caractéristiques des polystyrènes expansés :**

- Fin de vie
  - ✓ Non recyclables
- Application
  - ✓ Isolation extérieur, doublage intérieur, béton allégés,
- Avantages
  - ✓ Performant
  - ✓ Peu coûteux
- Inconvénients
  - ✓ Ressource non renouvelable
  - ✓ Énergie grise
  - ✓ Dégagement de pentane (couche d'ozone, effet de serre)
  - ✓ Dégagement de styrènes à la chaleur
  - ✓ Peu perspirant
  - ✓ Incendie =dégagement de substances toxiques.

#### **I .2.3.types de bétons :**

La classification des bétons se fait suivant différents critères, comme :

## I .2.3. 1. Leur destination [9]

Tableau. I.6.Types de béton en fonction de leur destination [9].

Types de béton	Destination
Bétons compactés au rouleau	bétons spéciaux pour réaliser certain type de barrage (barrages poids).
Bétons projetés	Pour réaliser les travaux miniers et souterrains, pour la réparation des ouvrages détériorés
Bétons de construction	destinés à la construction courante des bâtiments ou des ouvrages de faible importance
Bétons autonivelants (autoplaçants)	Pour les ouvrages présentant un ferrailage vraiment dense ou d'une forme variable difficile à mouler (courbures multiples).
Bétons coulables sous l'eau	Pour la construction ou la réparation des barrages, les structures portuaires, les tunnels
Bétons fibrés	Pour les dallages (fibres métalliques), piste d'aéroport ou des pièces techniques telles que les tuyaux, gaines (fibres de verre).

## I .2.3.2.Leur masse volumique

Selon la classification européenne, il y a trois classes de béton qui sont représentées ci-dessous dans le tableau suivant :

Tableau. I.7.Types de béton en fonction de leur masse volumique.

Types de béton	Béton léger	Béton normal	Béton lourd
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	De 800 à 2000	De 2000 à 2600.	Supérieure à 2600

## I .2.3.3. Leur granularité

La classification se fait en fonction de la dimension maximale des granulats  $D_{\max}$  :

Tableau. I.8.Types de béton en fonction de  $D_{\max}$ .

Classes du béton	Béton fin	Béton moyen	Béton gros
Dimension maximale des granulats $D_{\max}$	$8 \leq D_{\max} < 16\text{mm}$	$16 \leq D_{\max} < 31.5$	$31.5 \leq D_{\max} < 63$

## I .2.3.4. Leur consistance (cône d'Abrams)

Elle est définie en utilisant le cône d'Abrams, et on obtient les cinq classes suivantes :

Tableau. I.9.Types de béton en fonction de leur consistance.

Affaissement (Aff.) en cm	Classe des bétons
0 à 2	Très ferme
3 à 5	Ferme
6 à 9	Plastique
10 à 13	Mou
>14	Très mou

### I .2.3.5. Leur résistance à la compression sur cylindre $f_{ck}$ [34]

La norme EN-206 classe les bétons en fonction de leur résistance caractéristique à la compression conformément au tableau I.10. Dans ce tableau  $f_{ck-cyl}$  est la résistance caractéristique mesurée sur cylindres (c'est cette résistance qui correspond à la résistance caractéristique à laquelle il est fait référence dans l'Euro code 2) ;  $f_{ck-cube}$  est la résistance caractéristique mesurée sur cubes.

**Tableau. I.10. Classes de résistance à la compression. [10]**

Classes	C 8/10	C 12/15	C 16/20	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 45/55
<b>F<sub>ck-cyl</sub></b> (N/mm <sup>2</sup> )	8	12	16	20	25	30	35	45
<b>F<sub>ck-cube</sub></b> (N/mm <sup>2</sup> )	10	15	20	25	30	37	45	55

### I .2.4. Propriétés du béton : [11]

Le béton doit être considéré sous deux aspects :

- **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 œuvre dans son coffrage ;
- **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.

#### I .2.4.1 Propriétés du béton frais :

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité qui est la facilité offerte à la mise en œuvre 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.

**I .2.4.2 Propriétés du béton durci : [11]**

Lorsque le béton a durci, sa forme ne peut plus être modifiée mais ses caractéristiques continuent d'évoluer pendant de nombreux mois, voire des années.

- ✓ La compacité d'un béton (ou sa faible porosité) est un avantage déterminant pour sa durabilité.
- ✓ Une bonne résistance à la compression est la performance souvent recherchée pour le béton durci.
- ✓ Les phénomènes de retrait sont une caractéristique prévisible dans l'évolution du béton.
- ✓ Les caractéristiques de déformations sous charge du béton sont connues et peuvent être mesurées.

**I .3.Conclusion :**

Dans ce chapitre on présente les caractéristiques des matériaux utilisées dans les confections des éprouvettes.

# *CHAPITRE II*

*Contexte du contrôle  
non destructif*

## Chapitre II : Contexte du contrôle non destructif

### II.1.généralité :

Le contrôle non destructif par ondes guidées générées et détectées par des transducteurs ultrasonores à couplage par air, présente deux avantages majeurs. Le premier réside dans la capacité des ondes guidées à transporter l'information sur la qualité du milieu sur une grande distance. De plus, l'absence d'un milieu de couplage liquide entre les capteurs et le milieu à tester, rend le contrôle plus commode. Ce travail consiste d'abord à développer un procédé de simulation numérique qui prend en considération de nombreux paramètres du système de contrôle. Dans une optique de réduire le nombre de degrés de liberté, un modèle hybride a été développé qui consiste en une combinaison entre un modèle analytique basé sur l'intégrale de Kirchhoff pour la propagation des ultrasons dans l'air et un modèle éléments finis de la propagation des ondes guidées dans le matériau. La mesure des caractéristiques du transducteur à couplage par air (efficacité de l'émetteur et sensibilité du récepteur) permet, d'une part, de calculer la valeur exacte de la pression dans l'air et les valeurs exactes des champs de contraintes et de déplacements dans la structure, pour une tension et une fréquence d'excitation, et d'autre part, de remonter à la tension électrique aux bornes de ce récepteur pour une pression rayonnée par le matériau. Par suite, cette caractérisation rend possible la comparaison entre les prédictions numériques de la réponse (en niveau de tension) du système et les mesures expérimentales correspondantes. A la lumière du modèle numérique développé, une optimisation des paramètres du système de contrôle (angle, fréquence, diamètre, direction de propagation, champ proche et champ lointain) a été effectuée pour améliorer la pureté des modes guidés par le matériau. Une manipulation expérimentale, basée sur un transducteur à couplage par air pour l'émission et une sonde laser pour la réception, a été alors mise en place pour valider quelques prédictions numériques. Ensuite, on a étudié l'interaction des ondes guidées ultrasonores avec des défauts de type délaminage enfouis dans une plaque composite à symétrie quadratique. Pour cela, on a analysé la sensibilité des deux modes fondamentaux A0 et S0 au délaminage en termes de détectabilité. En parallèle, on a traité un problème inverse qui consiste à dimensionner un délaminage par le calcul du spectre fréquentiel du coefficient de réflexion. Enfin, on a mis en évidence le potentiel des transducteurs à couplage par air à ausculter des pièces aéronautiques impactées. [12]

## II.2. Définition :

Le Contrôle Non Destructif (C.N.D.) est un ensemble de méthodes qui permet de caractériser l'état d'intégrité de structures industrielles, sans les dégrader, soit au cours de la production (les pièces qui sortent des fonderies ne sont jamais exemptes de défaut), soit en cours d'utilisation (apparition de défaut). Il faut donc déterminer (à la casse, de façon empirique) quelle taille de défaut est acceptable et ensuite pouvoir les détecter, sans casser la pièce, et la remplacer si besoin est. On parle aussi d'Essais Non Destructifs ou d'Examen Non Destructifs (E.N.D.).

## II.3. principe du CND :

- ✓ Génération par un **émetteur** d'un signal qui est perturbé par la pièce à contrôler
- ✓ Un **récepteur** permet de recueillir la réponse du à la pièce. [13]

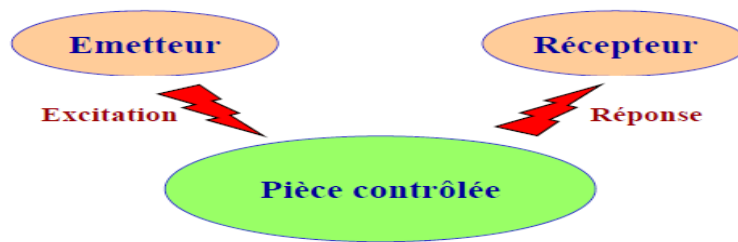


Figure II.1.principe du CND.

## II.4. Les objectifs du CND :

Le contrôle non destructif a pour objectif, comme son nom l'indique, de contrôler l'état des pièces industrielles sans pour autant que les examens correspondants ne puissent nuire à leur utilisation future. Ceci peut correspondre à deux types de contrôles : l'estimation d'un paramètre constitutif de la pièce comme par exemple l'épaisseur d'une paroi, la distance à un objet, les propriétés électromagnétiques constitutives du matériau ; la recherche d'une rupture de ces paramètres. Dans le deuxième cas, il s'agit en général de défauts, qui peuvent être par exemple des fissures, des inclusions, des porosités, des effets de la corrosion ou de la fatigue mécanique.

Cette procédure de contrôle se produit souvent plusieurs fois au cours de la vie d'une pièce et doit satisfaire au mieux les critères suivants :

### ➤ la rapidité d'exécution :

Il faut que le contrôle soit rapide pour qu'il ne soit pas trop pénalisant à la fois en termes d'immobilisation physique de chaque pièce, mais aussi au niveau des coûts que sont le temps de travail de la main-d'œuvre ou les frais de fonctionnement de l'usine.

➤ **le coût :**

Le contrôle qualité représente sur les pièces complexes un coût non négligeable et qui doit être minimisé dans la mesure du possible.

➤ **la reproductibilité :**

La mesure ne doit pas souffrir des circonstances extérieures : une même pièce contrôlée plusieurs fois doit toujours donner le même résultat.

➤ **la fiabilité :**

Le contrôle doit remplir son cahier des charges, et par exemple détecter tous les défauts qu'il est censé être capable de détecter, indépendamment des conditions d'inspection.

➤ **la sensibilité :**

La sensibilité est le rapport des variations de la mesure et du mesurande. Plus la sensibilité est grande, plus les petites variations du mesurande sont détectables, comme par exemple les défauts de faibles dimensions.

➤ **la résolution :**

La résolution est la plus petite variation de signal pouvant être détecté, par exemple la dimension du plus petit défaut. Usuellement est défini le pouvoir de résolution, ici la dimension du plus petit défaut visible. Le pouvoir de résolution est fort si cette dimension est petite. [14]

## **II.5. Les différentes techniques : [14]**

La diversité des pièces à inspecter, de leurs géométries, de leurs matériaux et des conditions d'inspection, interdit à une méthode de CND d'être universelle. Un certain nombre de techniques existe et chacune présente certains avantages et inconvénients. Il n'est pas question ici d'établir une liste exhaustive des techniques utilisées dans le domaine du CND, mais de donner un aperçu global des techniques les plus répandues industriellement.

### **II.5.1. Procédés optiques :**

Les procédés optiques constituent un type de techniques qu'il convient de séparer en deux catégories, selon que le contrôle soit automatisé ou non. L'examen visuel, contrôle ancestral le plus élémentaire, est la base des contrôles optiques non automatiques. Il peut être aidé, par un éclairage laser ou classique, une loupe binoculaire, ou un système de télévision<sup>1</sup>. Il reste cependant sujet aux inconvénients liés à l'œil humain, c'est-à-dire une faible productivité et une certaine subjectivité, entraînant un manque de fiabilité. De façon automatique, sont réalisées en général des acquisitions d'images par balayage laser [15] ou par utilisation de barrettes de capteurs optiques [16], suivies de traitement d'images tel que le seuillage ou la reconnaissance de

formes. Ce type de contrôle, beaucoup plus efficace, est cependant beaucoup plus complexe à mettre en œuvre et par conséquent restreint à des applications très particulières.

### **II.5.2. Ressuage : [17]**

Le ressuage est sans doute une des techniques de CND les plus anciennes puisque cela fait une cinquantaine d'années que l'on fait appel à ses services. Un des intérêts de la technique réside dans la simplicité de sa mise en œuvre. Un autre intérêt tient au fait qu'il s'agit d'une méthode globale, en ce sens qu'elle autorise un examen de la totalité de la surface de la pièce.

Elle permet de bien apprécier la longueur des défauts ; leur orientation n'a aucune importance.

L'exploitation de la méthode comporte trois étapes. La phase initiale consiste à nettoyer la surface de la pièce et de lui appliquer un liquide pénétrant, soit par immersion, soit par pulvérisation. La durée d'application est variable d'un type de pénétrant à l'autre, mais il se situe en général entre 15 et 30 minutes. Le choix du liquide dépend essentiellement de la rugosité de la surface à contrôler et de la porosité du matériau. Suivant le cas, on prendra un produit coloré (faible sensibilité), un produit pré-émulsionné (sensibilité moyenne) ou un produit fluorescent à post-émulsion (sensibilité élevée).

Le pénétrant appliqué vient s'infiltrer dans les plus petits interstices débouchant en surface. Après avoir laissé "poser" le pénétrant, on passe à la deuxième étape, qui consiste à rincer la surface de la pièce afin d'enlever l'excès de pénétrant. Cette opération est délicate. Un rinçage excessif enlèverait le pénétrant présent à l'intérieur des défauts. Si au contraire le rinçage est insuffisant, du pénétrant risque de subsister en surface, pouvant laisser croire à l'existence de défauts.

On passe alors à la troisième étape, qui consiste à appliquer un révélateur sur la surface ainsi rincée, puis séchée. Le révélateur peut être liquide ou sous forme de poudre.

Il ne reste plus alors à éclairer la pièce d'une façon appropriée (qui dépend du pénétrant utilisé) et d'observer visuellement la surface de la pièce : les défauts "ressortent".

De par son principe même, le CND par ressuage permet seulement de mettre en évidence que les défauts débouchant en surface, et elle ne donnent aucune indication sur le volume, et donc l'importance de ces défauts. On l'a vu, un rinçage excessif ou au contraire insuffisant peut conduire à des erreurs d'interprétation.

Une des tendances actuelles porte sur l'automatisation du procédé. Le traitement d'images par informatique constitue une des évolutions les plus prometteuses.

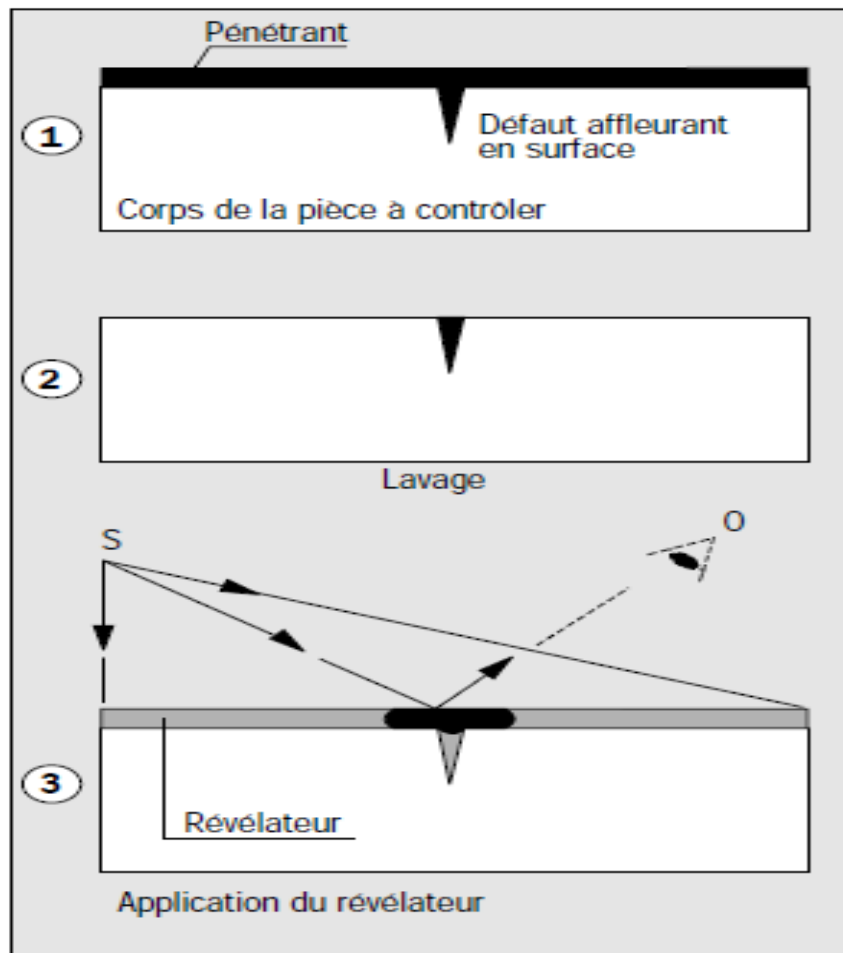


Figure II.2. Le contrôle par ressuage comporte 3 étapes.

### II.5.3. Radiographie :

La radiographie industrielle est comparable à la radiographie médicale : elle consiste à faire traverser par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde, comme les rayons X ou les rayons  $\gamma$ , la matière à inspecter. Lors de leur passage à l'intérieur de la pièce, les photons voient leur énergie absorbée totalement ou partiellement par la matière, selon sa densité. Un film placé derrière la pièce est irradié par les photons qui ont encore suffisamment d'énergie.

Il récupère ainsi le radiogramme, où les zones avec des défauts sont représentées par une variation de la densité optique [18].

Si la radiographie réussit à produire des images précises, fiables et interprétables, l'utilisation de tels dispositifs restent complexes, en particulier à cause de la mise en place nécessaire de procédures de protection du personnel et de la faible productivité qui engendrent un coût de contrôle important. La radiographie est utilisée notamment dans le domaine de la fonderie [19] ou pour la recherche de défauts dans les soudures.

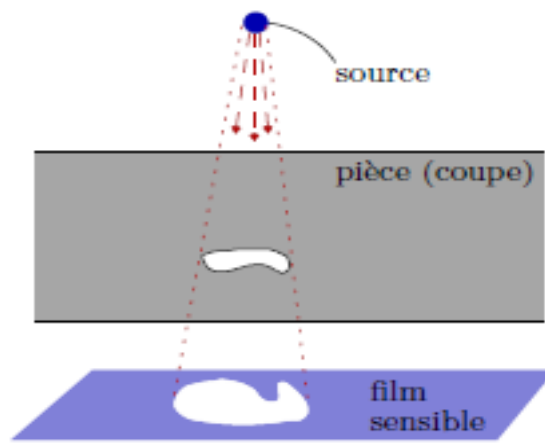


Figure II.3.Principe de radiographie.

#### II.5.4. Ultrasons : [17]

Contrairement aux techniques précédentes, le contrôle par ultrasons se prête bien au contrôle du cœur de pièces, même très épaisses (jusqu'à plusieurs mètres). Le principe est simple : un transducteur émet une impulsion ultrasonore qui se propage à l'intérieur du matériau à contrôler, puis se réfléchit sur les obstacles présents (défauts, faces de la pièce,...).

Les échos reviennent ensuite à la surface. Connaissant la vitesse de propagation des ultrasons dans le matériau et le temps aller-retour d'une impulsion ultrasonore envoyée par le transducteur, on en déduit la distance parcourue par cette impulsion et, en définitive, la profondeur du défaut.

Les impulsions ultrasonores sont en fait des rafales d'ondes ultrasonores, dont la fréquence est choisie en fonction des caractéristiques du matériau à contrôler (on travaille en général à des fréquences comprises entre 1 et 10 MHz). Les vitesses de propagation des ultrasons sont élevées (par exemple 5 940 m/s pour les ondes longitudinales dans l'acier) et les distances parcourues sont relativement petites (même si la pièce à contrôler est épaisse) : l'écart entre les échos est donc faible, disons de quelques  $\mu$ s à quelques dizaines de  $\mu$ s, et il faut donc disposer d'une électronique assez rapide pour pouvoir réaliser cette discrimination entre échos. D'autre part, pour que la reconnaissance des échos soit possible, il ne faut pas qu'il y ait chevauchement entre l'émission et les différents échos : les rafales d'ondes ultrasonores, qui constituent les impulsions d'émission, doivent donc être de courte durée, disons de l'ordre de quelques microsecondes.

L'objectif du contrôle par ultrasons est d'être certain de recueillir tous les échos dus à des défauts ; comme les impulsions arrivant sur un défaut obéissent aux lois de la réflexion, l'angle de réflexion dépend de l'orientation du défaut. Pour être sûr de ne pas "perdre" des échos, on peut être amené à utiliser plusieurs transducteurs pour la réception (et non plus un seul, qui sert à la fois à l'émission et à la réception). Dans le même ordre d'idée, certaines applications ne se

satisferont pas d'un traducteur droit (émission et réception perpendiculairement à la surface) et il faudra utiliser des transducteurs travaillant de façon oblique : ce genre de situation se présente par exemple lorsqu'on rencontre des défauts longitudinaux orientés perpendiculairement à la surface de la pièce, et donc très difficiles à détecter avec les transducteurs droits. Les transducteurs focalisés, qui permettent de focaliser l'énergie ultrasonore en certaines zones de la pièce à contrôler, contribuent également à détecter certains défauts difficiles d'accès pour les transducteurs classiques.

Aux fréquences utilisées, les ultrasons ne se propagent pas dans l'air pour assurer le passage des ultrasons entre le traducteur et la pièce à contrôler, il faut placer entre eux un milieu couplant. Dans les contrôles manuels, l'opérateur applique un liquide (graisse, huile, gels) sur la pièce à contrôler et déplace le transducteur sur le film ainsi constitué, en prenant bien soin de rester en contact. Dans les contrôles automatiques, où le déplacement des transducteurs est assuré par des bras motorisés, la solution consiste à immerger la pièce et le transducteur dans de l'eau ; ici, il n'est pas nécessaire que le traducteur soit en contact avec la pièce.

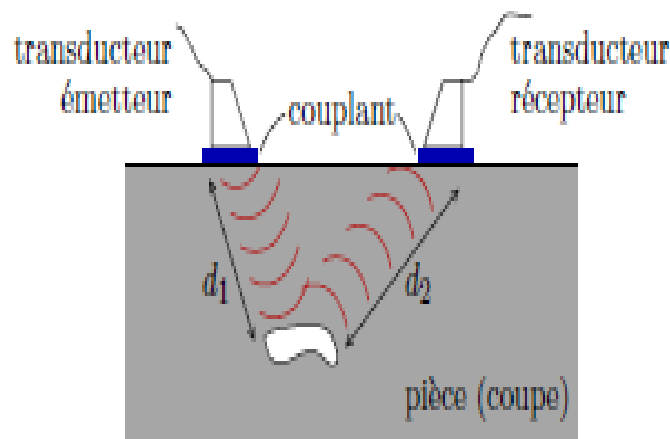
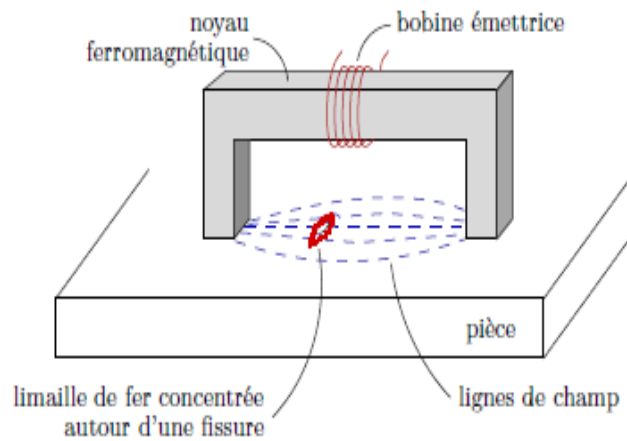


Figure II.4. Principe du contrôle par ultrasons.

### II.5.5. Flux de fuite magnétique :

Le contrôle par flux de fuite magnétique consiste à soumettre la pièce ou une partie de celle-ci à un champ magnétique constant. Les défauts superficiels provoquent, par l'importante variation de réluctance qu'ils représentent, une déviation des lignes de champ. Des flux de fuite magnétique sont engendrés localement. Ils sont ensuite généralement visualisés soit à l'aide d'un produit indicateur porteur de limaille de fer (magnétoscopie), soit à l'aide d'un film magnétisable (Magnétographie [20]), soit à l'aide d'appareils de mesure de champ magnétique.



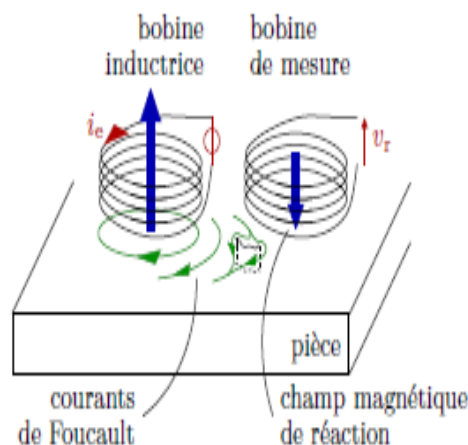
**Figure II .5.Principe de la magnétoscopie.**

Le CND par flux de fuite magnétique n'est utilisable que pour les matériaux ferromagnétiques.

Cette technique est particulièrement efficace pour les défauts de surface de très petites dimensions, mais donne difficilement de bons résultats pour les défauts enfouis. La mise en œuvre technique peut être complexe, à cause de la magnétisation originelle des matériaux et de la démagnétisation souvent nécessaires.

#### **II.5.6. Courants de Foucault :**

Cette dernière technique utilise des courants induits à l'intérieur de la pièce, appelés courants de Foucault. Pour ce faire, un excitateur externe est employé, souvent constitué d'une bobine parcourue par un courant alternatif. Les courants induits, parce qu'ils forment des boucles et sont à la même fréquence que le courant d'excitation, engendrent un champ magnétique alternatif de réaction sortant de la pièce à inspecter. Les défauts superficiels dévient les lignes des courants de Foucault, et par suite modifient le champ magnétique résultant [21]. La variation du champ magnétique est enfin mesurée au moyen d'un élément sensible au champ magnétique alternatif, qui peut être une bobine ou un capteur de champ magnétique.



**Figure II.6. Principe du CND par courants de Foucault.**

L'utilisation des courants de Foucault dans les applications de CND est limitée aux pièces électriquement conductrices. Elle s'étend de l'inspection des tubes (échangeurs, générateurs de vapeurs de centrales nucléaires) à la recherche des défauts débouchant sur des surfaces plus ou moins planes. Il est aussi possible de mesurer des épaisseurs de paroi ou la perméabilité magnétique du matériau [22]. La principale difficulté est la faible pénétration des courants induits, selon l'effet dit « de peau », qui rend difficile la détection de défauts enfouis. C'est une technique sans contact et la rapidité d'établissement des courants induits donne la possibilité de déplacer très rapidement la sonde.

## **II.6. Propagation des ondes :**

### **II.6.1. Nature des ondes :**

De nombreux phénomènes physiques sont décrits par les propriétés de propagation des ondes. On peut citer les ondes se propageant à la surface de l'eau à la suite de la chute d'un objet, les vagues se déplaçant à la surface de la mer, les ondes produites sur les cordes vibrantes, les ondes sonores, les ondes radio, les ondes optiques, etc. Du point de vue mathématique, le mouvement et les propriétés de ces ondes sont décrites, dans une bonne approximation, par une même équation, l'équation de d'Alembert (à une ou à plusieurs dimensions d'espace, suivant le cas), ce qui place l'étude des ondes sur un plan très général.

On peut distinguer deux catégories d'ondes. La première correspond aux ondes d'origine mécanique, élastique, thermodynamique, ou hydrodynamique, qui, pour se manifester ont besoin d'un support matériel préexistant, tel que système de ressorts couples, corde, gaz, liquide, etc. La seconde correspond aux ondes électromagnétiques (ondes radio, ondes optiques, rayons X, etc.) dues à la propagation de quantas d'énergie appelés photons, pouvant se déplacer dans le vide, indépendamment de tout milieu matériel préexistant. C'est la théorie de la relativité qui a mis en évidence, au début du vingtième siècle, ce dernier aspect. Auparavant, on supposait que les ondes électromagnétiques se propageaient, par analogie avec les autres types d'onde, dans un milieu ambiant inobservée, appelée éther. Les équations de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide, appelées équations de Maxwell, peuvent être considérées comme des équations fondamentales de la Physique Classique (dans la mesure où les forces gravitationnelles des échelles de l'Astronomie ou de l'Astrophysique ne sont pas considérées), alors que les équations des ondes de la première catégorie sont en général obtenues à partir d'approximations concernant le milieu considéré et l'amplitude des oscillations correspondantes (approximations des petits mouvements ou des petites oscillations).

### II.6.2. Le phénomène de propagation des ondes :

Une onde est généralement produite par la déformation localisée d'un milieu continu ; Celle-ci, après sa création, se déplace dans le milieu. Ce phénomène de déplacement est appelé propagation. Les exemples les plus visibles d'ondes sont les vagues à la surface de la mer et les excitations créées sur une corde tendue. On peut caractériser une onde par son amplitude, qui représente la "hauteur" de la déformation par rapport au milieu, par sa position moyenne à l'instant d'observation, par sa taille autour de sa position moyenne, et par sa vitesse de propagation. (La figure II.7) représente schématiquement des ondes unidimensionnelles transversales (corde vibrante, vague à la surface de l'eau, etc.).



**Figure II.7. Représentation schématique d'ondes transversales vues de profil.**

### II.7. les Avantages de CND :

- ✓ La performance et l'apparence de la structure ne sont pas modifiées,
- ✓ la possibilité de suivre le changement des propriétés du béton dans le temps,
- ✓ une plus grande sécurité, et une meilleure planification de la construction,
- ✓ par conséquent une progression plus rapide et plus économique.

### II.8. Le contrôle non destructif par ultrasons :

#### II.8.1. Introduction : [23]

Les tests par ultrasons représentent environ le tiers des essais non destructifs de matériaux ou de structures en tout genre, et dans des secteurs d'applications très diversifiés (Aéronautique, industries des transports, de l'énergie, Génie Civil, etc...). Parmi ces tests, on peut distinguer les contrôles non destructifs (CND) et les évaluations non destructives (END). Les premiers concernent la détection, la localisation voire le dimensionnement d'inhomogénéités (craquelures, fissures, délaminages, etc...) pouvant constituer des défauts préjudiciables ou pas, selon certains critères d'acceptabilité et de tolérance aux dommages. Les secondes visent à quantifier certaines propriétés physiques d'un matériau (densité, raideur, perméabilité, etc...) pour s'assurer de sa conformité par rapport à un cahier des charges. Les techniques les plus courantes sont maintenant bien rodées et ont été mises au point pour tester des éléments métalliques, donc isotropes et élastiques. L'emploi de plus en plus répandu des matériaux composites, ou encore le

développement des procédés d'assemblages par collage qui suppriment vis, boulons ou rivets, forcent les méthodes de CND/END à évoluer pour s'adapter aux forts changements des milieux.

En effet, la plupart des matériaux composites sont anisotropes (raideur plus forte dans le sens des fibres par exemple), viscoélastiques (notamment les matrices à base de polymères) et hétérogènes (fibres, plis). La propagation des ondes ultrasonores est par conséquent bien différente par rapport aux métaux, et les techniques ultrasonores classiques s'avèrent souvent inadaptées : déviation des faisceaux par l'anisotropie, atténuation par effet thermo-viscoélastique, diffraction par les interfaces entre plis, etc. Il est donc indispensable d'ajuster plusieurs paramètres (fréquence, focalisation, positions des palpeurs, milieu de couplage, etc...) pour adapter les procédés de CND/END existants ou encore de redéfinir de nouveaux procédés. Pour cela, deux approches sont possibles : la pratique avec de nombreux palpeurs et appareils, des échantillons calibres, et des campagnes de mesures très appliquées et systématiques, ou la simulation numérique avec un outil fiable et performant qui permette de faire varier à souhait tout paramètre du procédé de CND/END à moindre coût. C'est cette seconde solution qui est proposée dans cet article.

La technique de calcul est basée sur la méthode des éléments finis qui, contrairement aux méthodes analytiques ou semi analytiques, permet de définir des géométries complexes de structures ou de défauts. Pour réduire de manière significative les temps de calculs, les problèmes ne sont pas résolus dans le domaine temporel, mais dans le domaine fréquentiel.

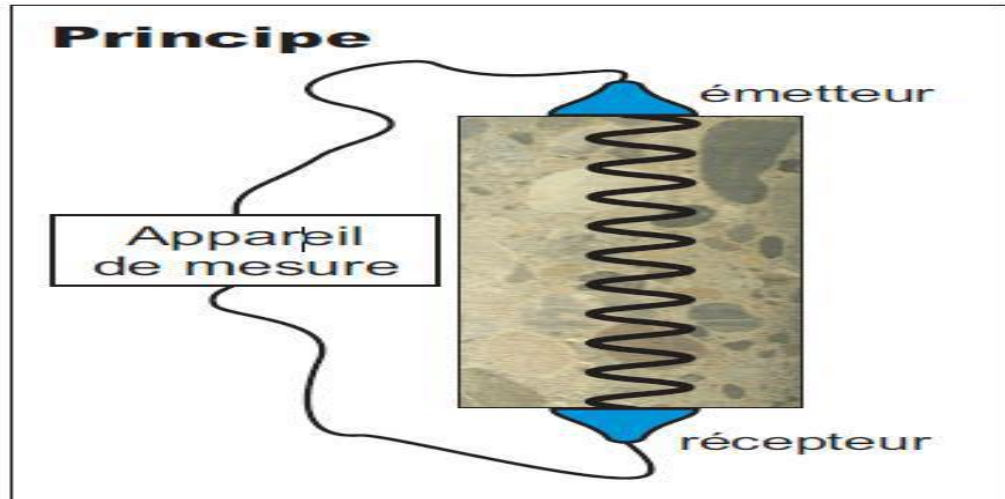
De plus, des régions absorbantes sont employées pour supprimer les réflexions généralement indésirables par les bords du domaine maille. Les simulations peuvent être effectuées en deux dimensions (problèmes plans ou axisymétriques) ou en trois dimensions, selon les cas de figure. L'anisotropie, la viscoélasticité ou encore l'empilement de plusieurs couches de matériaux sont pris en compte dans les modèles. Après une présentation rapide des principes fondamentaux de la méthode, un cas de validation est présent pour démontrer l'intérêt et la fiabilité de l'approche choisie. Ensuite, des exemples de simulations d'applications de CND ou d'END sont montrés pour afficher quelques possibilités de la méthode.

### **II.8.2.Définition des ultrasons:**

On appelle ultrasons les ondes élastiques dont la fréquence est comprise entre 16 kHz et quelques centaines de mégahertz [24], [25]. Les ultrasons possèdent les propriétés générales des ondes élastiques.

L'une des toutes premières applications des ultrasons fut, en 1912, la détection des icebergs puis, lors de la première guerre mondiale, le développement rapide de la détection des sous-marins et du sondage maritime. Le chercheur russe Sokolov semble avoir été le premier à suggérer l'emploi des vibrations ultrasoniques pour la détection des défauts dans les matériaux.

De nombreux systèmes sont susceptibles de produire des ultrasons. Un appareil produisant des ultrasons s'appelle un transducteur ou convertisseur d'ultrasons. Ce dernier développe un déplacement maximal à certaines fréquences particulières qui dépendent de la géométrie du transducteur. On appelle ces fréquences les fréquences de résonance. L'utilisation de ces transducteurs est généralement limitée à des fréquences particulières.



**Figure II.8.mesure par ultrasons.**

### **II.8.3. Les avantages principaux de mesure par ultrasons : [26]**

Les méthodes de contrôle non destructif sont nombreuses. Le contrôle par ultrasons est fréquemment utilisé car il présente de nombreux avantages :

- ✓ facilité de mise en œuvre
- ✓ Une mesure directe sans passer par des algorithmes de calcul
- ✓ Une réponse rapide usuellement en fraction de seconde
- ✓ Une très bonne résolution
- ✓ possibilité de travailler sur une seule face de la pièce à contrôler (pas besoin d'un accès à la deuxième face)
- ✓ capacité à traverser d'importantes épaisseurs de matière en fonction de la fréquence de travail
- ✓ l'existence de relations entre la propagation des ultrasons et les caractéristiques du matériau permet sa caractérisation
- ✓ L'utilisation des ultrasons offre donc la possibilité, sans aucune détérioration, d'une part de caractériser des matériaux afin d'en connaître les propriétés élastiques, et d'autre part de contrôler des pièces pour vérifier leur intégrité et repérer d'éventuels défauts d'élaboration (inclusions, soufflures, défauts de collage...) ou d'endommagement dû aux sollicitations (fissures...

### II.8.4. Détection des défauts :

Pour la détection des défauts, on emploie principalement la méthode par réflexion. La sonde a le double emploi d'émetteur et de récepteur. Tout changement de milieu sera repéré par l'écho qu'il provoque. On peut donc situer la position du défaut à l'intérieur de la pièce.

La méthode par transmission nécessite deux palpeurs, un émetteur et un récepteur, la pièce doit avoir au moins deux surfaces parallèles. Une troisième méthode (méthode de résonance) est basée sur l'influence qu'ont les défauts sur les fréquences de résonance d'une pièce.

Une assiette contenant une fissure ne sonne différemment qu'une assiette parfaite quand on frappe dessus. Pour appliquer cette méthode, il faut, comme dans l'exemple de l'assiette, posséder des pièces de référence tout à fait identiques à l'exception des défauts. La méthode est très puissante mais n'est utilisable que pour le contrôle d'une série d'objets tout à fait identiques.

### II.8.5. La propagation des ondes ultrasonores : [27]

Les techniques ultrasoniques sont basées sur la propagation d'ondes mécaniques mettant en jeu de très faibles déformations. Ce sont des techniques capables de caractériser en continu et d'une manière non destructive l'évolution de l'état de texturation du réseau solide d'un matériau réactif (plâtre, ciment et mortier,...). La mesure consiste à suivre les variations des vitesses de propagation d'ondes ultrasonores dans un matériau donné. Il existe deux types d'ondes acoustiques : les ondes longitudinales (ou ondes de compression) et les ondes transversales (ou ondes de cisaillement). Généralement, la propagation d'une onde plane peut être décrite par le vecteur déplacement  $u$  :

$$\vec{u} = \vec{U} \exp(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})$$

Où

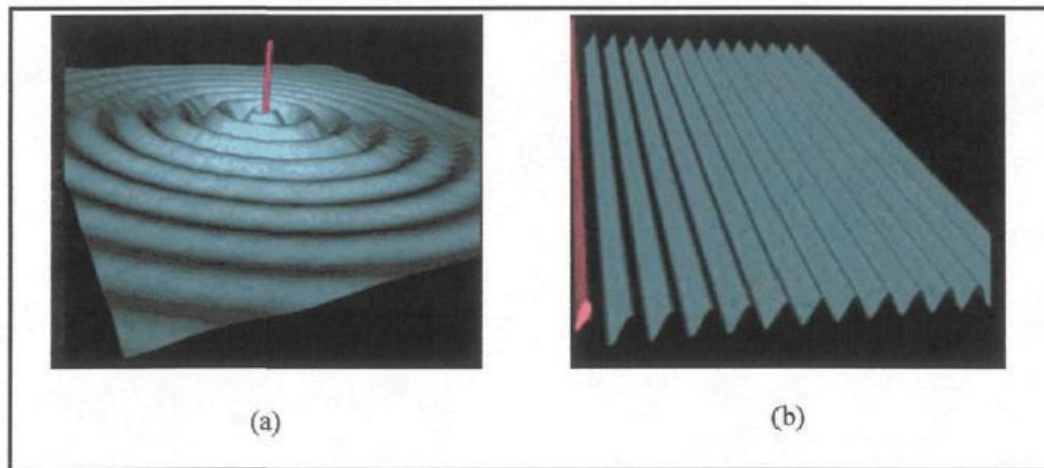
$U$  est l'amplitude du vecteur déplacement,

$\omega$  est la pulsation de l'onde,

$k$  est le vecteur d'onde.

Les ondes ultrasonores peuvent se propager dans les gaz, les liquides ou les solides, c'est-à-dire dans toutes substance possédant des propriétés élastique. lorsqu'elles se propagent dans un milieu infini, elles peuvent le faire soit avec une symétrie sphérique dans toutes les directions (source isotopique), soit sous forme de faisceaux parallèles d'ondes planes. Ceci dépend de la nature et de la géométrie de la source de vibration. De manière idéale, si le rayon de la source est petit vis-à-vis de la longueur d'onde émise, celle-ci est alors sphérique. Cependant, si le rayon

de la source est plus grand que la longueur d'onde émise, cette dernière est alors une onde plane (voir figure II .9).



**Figure II.9. Propagation d'onde ultrasonore, (a) onde sphérique, (b) onde plane.**

L'ultrason Très utilisée dans le milieu industriel car non destructif, cette méthode permet d'analyser rapidement la totalité du volume d'une pièce et d'évaluer la quantité de porosité. En effet, la présence de porosité dans les matériaux en général vient perturber fortement la propagation.

D'ondes ultrasonores [28] et [29]. La comparaison d'amplitude entre le signal d'entrée et le signal de sortie donne une estimation de la Quantité de porosités présentes dans la pièce peut être déterminée.

#### **II.8.5.1. Propagation des ondes ultrasonore dans un milieu solide : [27]**

Les deux modes principaux utilisés en contrôle industriel concernent les ondes longitudinales, appelées ondes de compression ou ondes de dilation dans la théorie de l'élasticité, et les ondes transversales appelées également ondes de cisaillement. La longueur d'onde  $\lambda$  est liée à la vitesse de propagation  $v$  par la relation :

$$f = 1/t \dots \dots \dots (1)$$

F : fréquence de la vibration.

t: Temps.

$$\lambda = v \cdot t \dots \dots \dots (2)$$

$v$ : La vitesse de propagation

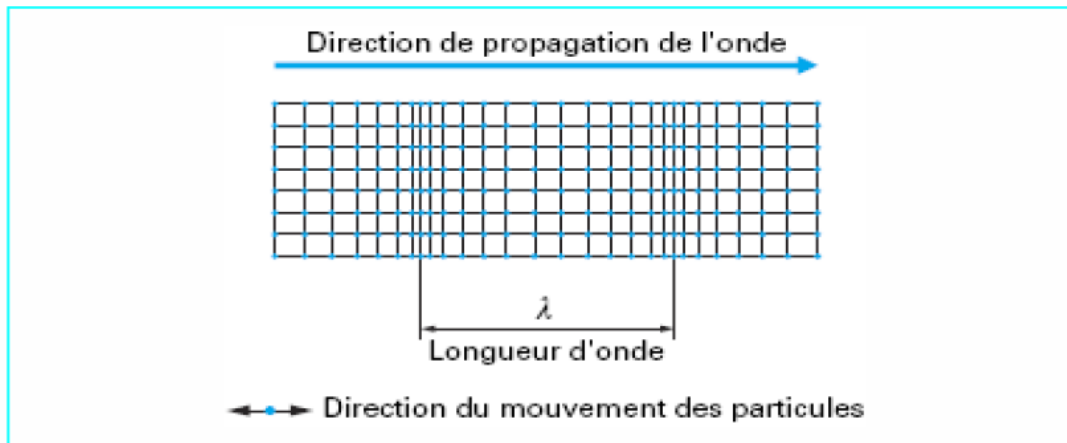
De (1) et (2) la longueur d'onde est obtenus par l'équation suivante :  $\lambda = v/f$

La propagation d'ultrasons dans les milieux solides, dépendamment de la puissance du transducteur, peut produire un échauffement ou une vibration. Dans les solides cependant, non seulement les forces de compression sont transmises, mais aussi les forces de cisaillement.

C'est pourquoi, en plus des ondes longitudinales, des ondes transversales et des ondes de torsion peuvent se propager. La nature des ondes existantes dans un milieu dépend beaucoup de la forme et des dimensions de ce milieu. Si on s'intéresse à un solide de dimension finie, les ondes longitudinales ou de compressions sont caractérisées par le fait que la direction de la vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde, tel qu'illustrée à la (figure II.10). La vitesse des ondes longitudinales est donnée par la formule suivante [30].

$$v_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

Où (E) est le module de Young et ( $\rho$ ) la masse volumique, ( $\nu$ ) le coefficient de poisson.



**Figure II.10. propagation des ondes longitudinales dans un solide.**

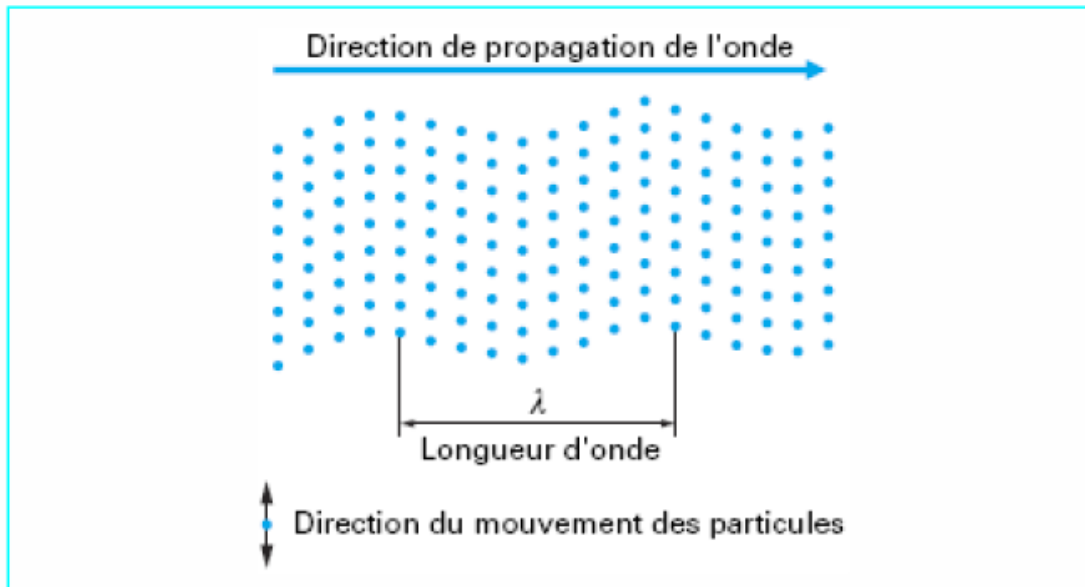
Par opposition, on peut distinguer les ondes transversales ou de cisaillement, lorsque la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde, comme illustré à la (figure II .11). La vitesse des ondes transversales est donnée par [30] :

$$v_t = \sqrt{\frac{\mu_s}{\rho}} \dots\dots\dots(3)$$

$\mu_s$  : est le module d'élasticité transversale.

Puisque  $E\gamma = 2(1+\nu)$  avec  $\nu$  est le coefficient de Poisson, l'équation (3) peut s'écrire comme suit [Brown et Goodman, 1971] :

$$v_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}$$



**Figure II.11. propagation des ondes transversales dans un solide.**

On montre aisément que, compte tenu des relations précédentes et des valeurs courantes du module d'Young et du coefficient de poisson, les ondes longitudinales se propagent à une vitesse supérieure de 50 à 100 % à celle des ondes transversales. Ce facteur est d'une grande importance pour différencier les deux types d'ondes.

- En dehors de ces deux types d'ondes, il existe des ondes ultrasonores qui se propagent à la surface des matériaux. Dans le cas des matériaux épais de la longueur d'onde, les ondes de surface, dites ondes de Rayleigh, sont le résultat de la superposition d'une onde longitudinale et d'une onde transversale de même fréquence.

Elles intéressent une faible épaisseur du matériau au voisinage de la surface libre, de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde, et présentent une très grande sensibilité à toute discontinuité de surface, quelque soit son orientation.

La vitesse est donnée par l'expression ci-dessous [30]:

$$v_S = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} \sqrt{\frac{\mu s}{\rho}}$$

- Les ondes de plaques ou ondes de Lamb correspondent à des ondes de surface qui se propagent dans des matériaux dont l'épaisseur est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Dans ce cas, l'onde vibratoire intéresse toute l'épaisseur de la plaque. Il existe alors une infinité de modes de vibration dépendant du nombre de nœuds et de ventres présents dans l'épaisseur.

On distingue deux grandes familles d'ondes de Lamb, suivant que la plaque vibre en conservant un plan de symétrie (modes symétriques ou de compression S) ou non (modes antisymétriques ou de flexion A). Les deux premiers modes symétriques et antisymétriques sont représentés sur la (figure II .12).

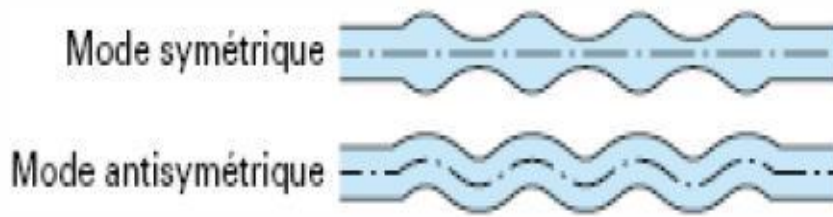


Figure II.12. Ondes de Lamb :

### II.8.5.2. Propagation des ondes ultrasonore dans un milieu liquide.

La propagation des ultrasons dans les liquides se limite à celle d'ondes longitudinales puisque ces milieux ne peuvent résister aux contraintes tangentielles. La vitesse avec laquelle les ultrasons se propagent dans le milieu dépend de l'élasticité et de la densité du milieu. Elle est donnée par l'équation suivante [30]:

$$v = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

- $k$  est le constant élastique approprié en  $\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ .
- $\rho$  la densité du milieu en  $\text{kg.m}^{-3}$ .

Lorsque les ondes sonores se propagent dans un liquide, on observe une perte d'énergie due au mouvement relatif des particules qui constituent le milieu. Elle est due aux forces de viscosité qui tend à dégrader l'énergie acoustique en chaleur [30]. La viscosité dans ce cas, est équivalente à la rigidité pour un matériau. Ainsi, plus la viscosité est élevée plus la température du milieu augmente.

### II.8.6. Émission et réception de l'onde ultrasonore : [27]

L'intensité d'une onde acoustique qui se propage dans les différents milieux s'atténue le long de son parcours. Plusieurs facteurs contribuent à cette atténuation telle que l'absorption, la réfraction, la réflexion et la diffusion. L'émission d'impulsions ultrasoniques dans un solide produit deux effets: un effet thermique qui dépend de la puissance acoustique de l'onde et qui engendre une propagation de la chaleur dans le milieu et un effet mécanique qui est la transmission, la réflexion et la dispersion.

#### II.8.6.1. Description du faisceau ultrasonore émis :

La théorie de la diffraction montre qu'un faisceau ultrasonore émis par une source plane, circulaire de rayon  $r$  répondant à la condition  $r > \lambda$ , ( $r$  est le rayon de la source,  $\lambda$  est la longueur d'onde) comprend deux parties, une zone initiale cylindrique et une zone distale conique où le faisceau diverge [30], que l'on nomme respectivement la zone de Fresnel et la zone de Fraunhofer.

### II.8.6.2. Atténuation d'une onde ultrasonore :

L'atténuation d'une onde ultrasonore dépend principalement de la fréquence considérée. Pour la plupart des matériaux, plus la fréquence est haute plus l'atténuation est importante. La théorie prévoit que l'atténuation est directement proportionnelle au carré de la fréquence pour une onde plane [31].

### II.8.6.3. L'absorption et la dispersion :

L'absorption des ultrasons dans les solides dépend beaucoup de la structure de ces derniers. Dans les milieux homogènes, l'absorption du son est due essentiellement au coefficient de viscosité et à la conductivité thermique. Comme dans les liquides, l'absorption est proportionnelle au carré de la fréquence sonore. Dans le cas des substances poly cristallines comme la glace, c'est-à-dire des substances formées d'un grand nombre de petits cristaux séparés (les monocristaux), l'absorption du son est principalement déterminée par les dimensions relatives des cristaux et de la longueur d'onde. À haute fréquence, lorsque la longueur d'onde  $\lambda$  est petite par rapport à la taille des cristaux, l'absorption se fait dans chaque monocristal. Le coefficient d'absorption étant proportionnel au carré de la fréquence dans ce cas, il est égal à [30].

$$\mu = \frac{8\eta\pi^2}{3\rho\lambda^2 c}$$

$\mu$  : est le coefficient d'absorption en  $\text{m}^{-1}$ .

$\eta$  : est le coefficient de viscosité qui varie en fonction de la température en  $\text{kg/m.s}$

$\rho$  : est la densité du milieu en  $\text{kg/m}^3$

$c$  : est la vitesse du son dans le milieu en  $\text{m/s}$

$\lambda$  : est la longueur de l'onde ultrasonore en  $\text{m}$ .

### II.8.6.4. Réflexion et réfraction de l'onde ultrasonore :

Lors du passage d'une onde ultrasonore à travers une interface séparant deux milieux de caractéristiques acoustiques différentes, une partie de l'onde incidente est réfléchiée et une autre est réfractée. L'énergie contenue dans l'onde réfractée est égale à l'énergie de l'onde incidente diminuée de celle contenue dans l'onde réfléchiée. Le mécanisme de réflexion d'une onde ultrasonore est un point important dans l'étude de propagation d'ondes ultrasonores dans un milieu.

### II.8.7. Vitesse de propagation des ultrasons : [32]

On produit un train d'impulsion de vibration au moyen d'un émetteur appliqué sur l'une des faces de l'élément à contrôler.

Après avoir franchi une longueur de parcours (L) dans le béton, l'impulsion de vibration est convertie en un signal électrique à l'aide d'un récepteur et la base de temps électronique permet de mesurer le temps de propagation des ondes ultrasonores ( $\delta t$ ).

La vitesse de propagation des ultrasons est donnée par la formule :

$$v = \frac{l}{\delta t}$$

Avec :

$l$  = longueur de parcours

$\delta t$  = le temps de propagation des ondes ultrasonores.

### II.8.8. Méthodes de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons : [32]

#### II.8.8.1. Mesures en transparence directe:

Utilisées dans le cas des éprouvettes ou de poteaux ou dans certaines poutres, les transducteurs (émetteur et récepteur) sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester.

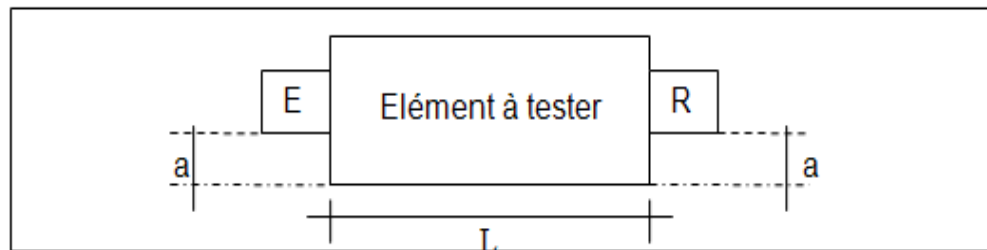


Figure II.13. Mesures en transparence directe.

#### II.8.8.2. mesure en surface :

Utilisées sur tous les éléments de structure et sur éprouvettes, 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.

Après avoir porté graphiquement les temps et les distances, on trace la droite moyenne de ces différents points dont la pente correspond à la valeur de la vitesse du son dans le milieu considéré.

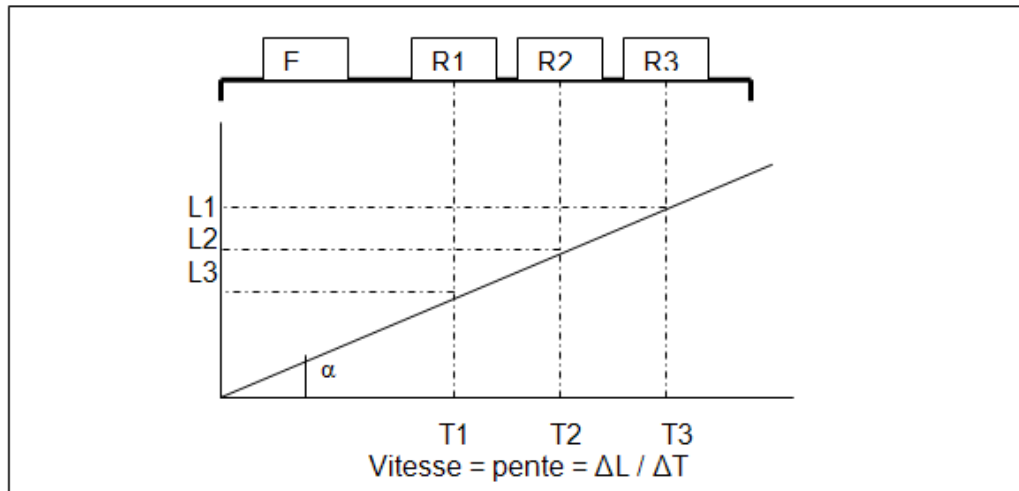


Figure II.14.mesure en surface.

### II.8.8.3. Mesures en transparence par Rayonnement :

Cette méthode consiste à placer l'émetteur en un point fixe, et sur la face opposée ou perpendiculaire, on déplace à intervalle constant le récepteur sur une ligne.

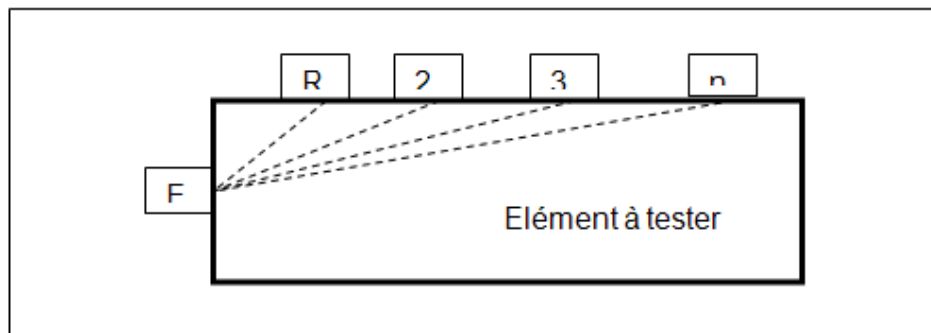
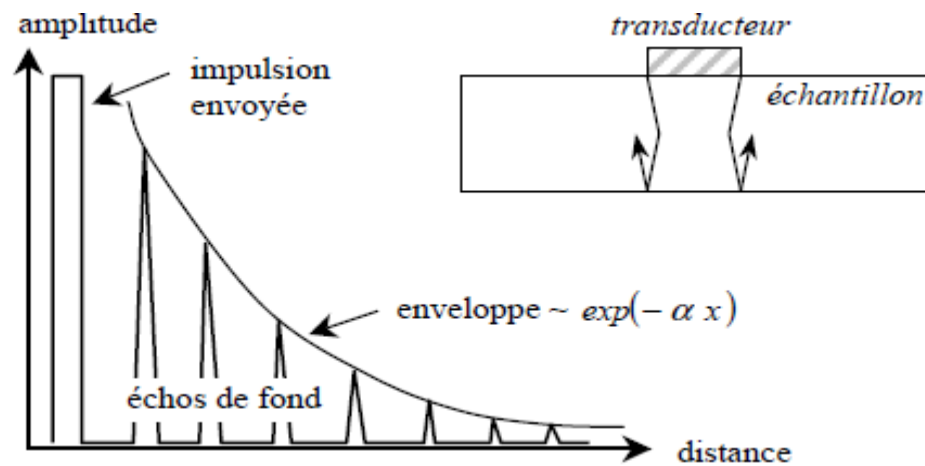


Figure II.15.mesure en transparence par rayonnement.

## II.9. L'Atténuation de propagation ultrasonore : [26]

### II.9.1. Généralités et définition de l'atténuation :

Une onde ultrasonore perd de l'énergie lors de sa propagation dans un milieu réel. Cette observation expérimentale immédiate constitue une caractéristique importante de la propagation. Dans un matériau homogène et à faces parallèles par exemple, on observe cette perte d'énergie en enregistrant les échos successifs par une mesure en écho. L'enveloppe d'une séquence d'échos de fond de pièce présente alors une décroissance exponentielle de l'amplitude de la forme  $\exp(-\alpha x)$ , en négligeant les effets de la diffraction du faisceau [33] (Figure II.16).



**Figure II.16 Décroissance exponentielle des échos en négligeant la diffraction [GOE80].**

La notion d'"atténuation intrinsèque" que nous étudions désigne la perte d'énergie due exclusivement aux interactions entre la microstructure du milieu et l'onde. Elle ne dépend ni de la géométrie de la pièce, ni de la méthode et de la configuration de mesure. Autrement dit, tous les phénomènes extérieurs ne peuvent être assimilés à l'atténuation intrinsèque du milieu traversé. Ces phénomènes peuvent être la réflexion/transmission aux interfaces entre l'échantillon et le milieu extérieur, ou encore la divergence du faisceau, propre à la propagation de tout faisceau de section limitée.

L'atténuation intrinsèque est causée par deux catégories de phénomènes :

#### **a) L'absorption :**

Elle résulte de la conversion de l'énergie mécanique vibratoire en chaleur. Ce type d'atténuation intrinsèque est lié à la viscosité du matériau contrôlé. La dissipation de l'énergie sous forme de chaleur est due d'une part à des pertes thermo élastiques résultant du déphasage entre contrainte et déformation, et d'autre part au non linéarité entre la contrainte et le déplacement atomique. Certains défauts cristallins comme les dislocations peuvent contribuer à l'atténuation par absorption.

#### **b) La diffusion :**

Dans le cas de la diffusion (aussi appelée dispersion), une fraction de l'onde est déviée ou réfléchi lors de la rencontre de discontinuités d'impédance acoustique (Figure II.17). Ces hétérogénéités acoustiques peuvent être des porosités, des précipités, des inclusions, des joints de grains, ou encore des défauts... Ici, une partie de l'énergie "quitte" le trajet rectiligne prévu par la théorie.

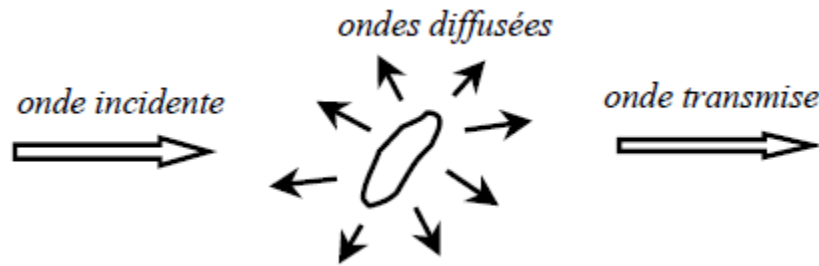


Figure II.17. Diffusion par une hétérogénéité.

### II.9.2. Méthodes de mesure de l'atténuation ultrasonore :

Les méthodes de caractérisation sont nombreuses. Celles utilisées pour mesurer l'atténuation ultrasonore peuvent être regroupées en trois catégories principales :

- les mesures au contact, pour lesquelles le (ou les) transducteur(s), piézoélectriques, sont en contact direct soit avec la pièce via un couplant, soit avec une pièce tampon elle-même en contact avec la pièce à caractériser,
- les mesures sans contact, c'est-à-dire les méthodes de mesure ne nécessitant aucun intermédiaire spécifique entre le capteur et la pièce,
- les mesures en immersion, où les transducteurs, piézoélectriques, peuvent être plus ou moins éloignés de la pièce, le dispositif étant plongé dans l'eau afin de permettre une meilleure propagation des ondes ultrasonores.

Toutes les méthodes de mesure sont fréquemment associées à une méthode de traitement du signal : la spectroscopie. C'est une technique qui permet de déterminer la relation de dispersion dans les matériaux dispersifs. Cette approche, basée sur l'analyse spectrale d'échos successifs, a été développée par Sachse, en 1978. Elle est actuellement très utilisée pour la caractérisation des matériaux.

### II.10. Conclusion :

L'évaluation non destructive du béton nécessite d'appréhender les paramètres qui influencent les procédures et mesures de contrôle. La modélisation des interactions des ondes avec les diffuseurs potentiels tels que les granulats et les microfissures nous a conduit à choisir des observables dynamiques face aux pathologies recherchées. Des essais sur des éprouvettes ont permis de confirmer que l'atténuation des ondes rétrodiffusées est plus sensible que la vitesse à la variation de teneur en eau et à l'endommagement. Cette technique est simple de mise en œuvre et conduit à des développements tant sur les aspects matériel que modélisation et exploitation des signaux.

# *CHAPITRE III*

*La compacité, la porosité et la  
densité des matériaux*

### Chapitre III : la compacité, la porosité et la densité des matériaux.

#### III .1.la compacité :

##### III .1.1.définition : [34]

La compacité du béton est une propriété essentielle qui conditionne notamment résistance mécanique et sa durabilité. Elle peut être définie par le rapport du volume absolu de matières solides (liants et granulats) au volume apparent total. Si l'on désigne par  $V_c$  (ciment),  $V_g$  (matériaux inertes),  $V_e$  (eau efficace),  $V_v$  (vides ou air) les volumes absolus occupés dans l'unité de volume du béton en place, on a :

$$V_c + V_g + V_e + V_v = 1$$

La compacité du béton c'est le complément à l'unité du volume de l'eau et de l'air inclus dans le volume1 du mélange :

$$C = V_c + V_g = 1 - (V_e + V_v)$$

La compacité peut donc être définie comme la différence entre le volume unitaire apparent et le volume des vides. Pour déterminer sa valeur, il est nécessaire de connaître le volume des vides c'est-à-dire la porosité. Elle est donc définie par :

$$C = V_s / V_t$$

La compacité est une donnée purement géométrique, la masse n'intervient pas.

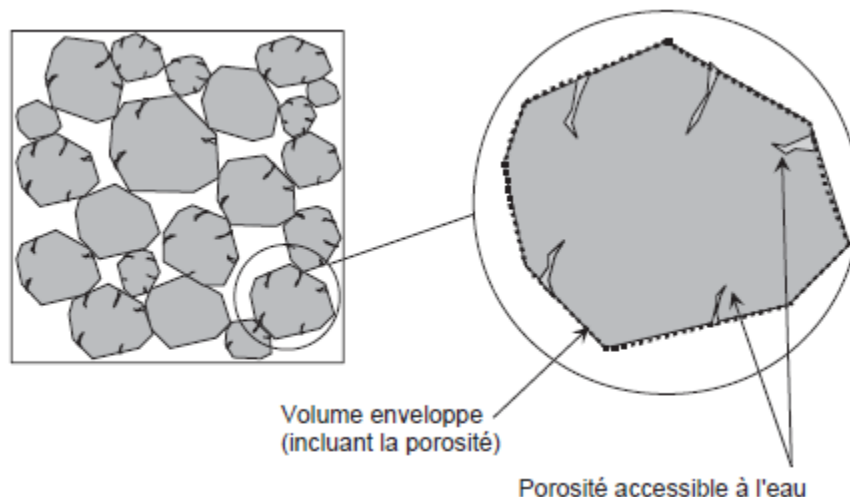


Figure III.1.schémas illustrant la notion de compacité.

##### III.1.2. Modèle d'empilement compressible : [35]

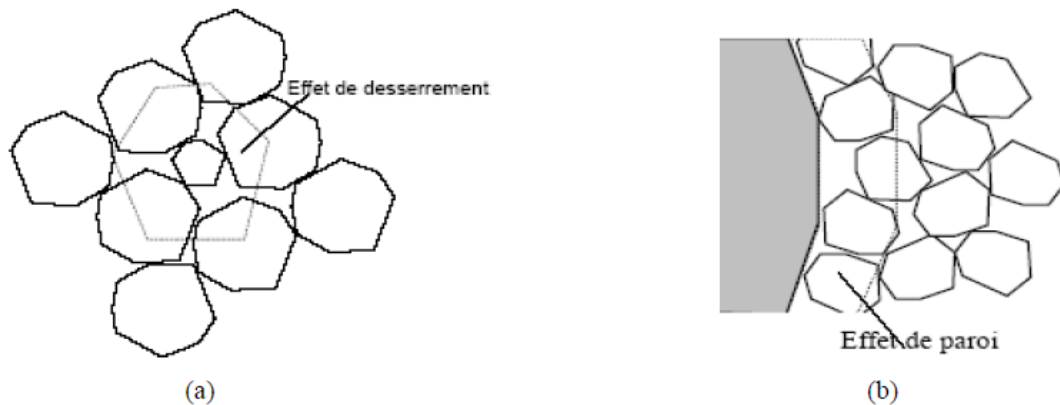
Grâce à ce modèle, la compacité réelle d'un mélange (noté  $\Phi$ ) à plusieurs classes est prédite à partir de la connaissance des compacités de chaque classe monodimensionnelle, de la distribution granulaire du système et de l'énergie de la mise en place. Il s'appuie sur les notions de compacité virtuelle ( $\gamma$ ) et d'indice de serrage ( $K$ ).

## III.1.2.1 Compacité virtuelle :

La compacité virtuelle est la compacité maximale qu'il est possible d'atteindre pour un mélange donné, chaque particule étant placée une à une et gardant sa forme originelle. Pour calculer la compacité virtuelle d'un mélange de n classes, on doit tenir compte de deux coefficients d'interactions : l'effet de paroi et l'effet de desserrement.

✓ L'effet de desserrement apparaît lors qu'un grain fin est inséré dans la porosité de L'empilement des gros grains et qu'il n'est pas suffisamment petit pour se placer dans un vide ; dans ce cas, il provoque une diminution de la compacité propre des gros grains (Figure III.1.a).

L'effet de paroi apparaît lorsque quelques gros grains isolés immergent dans l'océan des grains fins. Il existe alors une certaine quantité de vide dans l'empilement des grains fins, localisée à l'interface des gros grains (Figure III.1.b).



**Figure III.2. Illustration des coefficients d'interaction.**

Une fois que les interactions granulaires sont définies, en distinguant la classe dominante, la compacité virtuelle d'un mélange de n classes est exprimée par la formule suivante :

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^i \left[ 1 - \beta_i + b_{ij} \beta_i \left( 1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[ 1 - a_{ij} \beta_i / \beta_j \right] y_j} \quad (1-1)$$

$\gamma_i$  : compacité virtuelle lorsque la classe i est dominante,

n : nombre de classe dans le mélange,

$\beta_i$  : compacité résiduelle de classe i,

$y_j$  : proportion de classe j dans le mélange,

$a_{ij}$  : effet de desserrement exercé par un grain fin j dans un empilement de gros grains i,

$b_{ij}$  : effet de paroi exercé par un gros grain i dans un empilement de grains fins j.

### III .1.2.2.Compacité réelle :

Comme par définition, la compacité virtuelle est inaccessible à l'expérience. Donc, la formule (1-1) ne peut pas être utilisée directement pour la prédiction de la compacité réelle du mélange granulaire. Il est nécessaire de compléter cette formule.

A partir de la formule théorique de compacité virtuelle (Eq. 1-1), on constate que la compacité virtuelle ne dépend que de la caractéristique propre du matériau dans le mélange. En réalité, la compacité dépend non seulement du matériau mais également du mode de mise en place. Pour décrire la dépendance entre la compacité et le protocole de compaction, De Larra rd a introduit un paramètre appelé : indice de serrage « K » et développé un nouveau modèle baptisé « modèle d'empilement compressible ». Ce modèle permet de déterminer la compacité réelle d'un mélange connaissant sa compacité virtuelle et l'indice associé au protocole de compaction. L'expression du modèle est présentée par l'équation suivante :

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\Phi} - \frac{1}{y_i}}$$

K : indice de serrage qui ne dépend que du protocole (ou l'énergie) de compactage

$\Phi$ : compacité réelle du mélange de n classes

$\beta_i$ : compacité résiduelle de classe i,

### III .2. La porosité :

#### III .2.1. Introduction sur la porosité : [36]

Les corps poreux sont des agrégats d'éléments solides (grains, matrice, etc.) entre lesquels les vides forment l'espace poreux proprement dit.

Ce sont ces vides au sein du corps poreux qui induisent les grandes différences de comportements physiques que l'on observe entre les solides compacts (minéraux par exemple) et les corps poreux, assemblages complexes où la présence de fluide, même en très petite quantité, ne peut qu'ajouter à la complexité de l'ensemble.

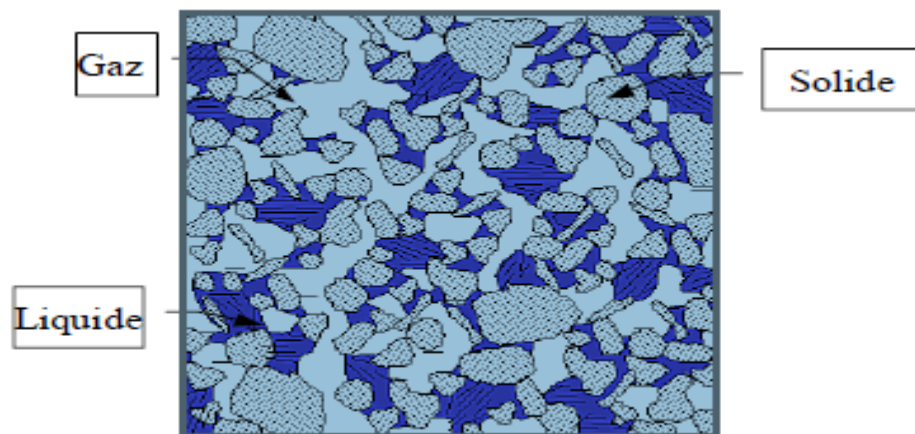
Le rapport du volume de vide au volume total du corps considéré est appelé porosité. Cette grandeur pétrophysique est le plus souvent facile à définir et à mesurer. Nous ne verrons pas contre combien le problème se complique lorsque l'on aborde la description géométrique de l'espace poreux. Si quelques cas particuliers – comme l'espace poreux existant dans un empilement de sphères de même diamètre – se prêtent à une description quantitative, la plupart des espaces poreux réels sont trop compliqués pour être traités de façon strictement géométrique. Il faut se limiter à des descriptions relatives, en essayant surtout de mettre évidence l'originalité du milieu particulier étudié par rapport aux espaces les plus couramment observés. Il sera par exemple important de bien distinguer dans le milieu étudié les pores proprement dits, c'est-à-

dire les volume de vide emmagasinant et laissant circuler les fluides , des joints de grains ou des micro fractures que sont surtout des surfaces de discontinuité entre des éléments solides et qui jouent un rôle primordial dans les propriétés mécaniques.

Devant l'échec relatif de la stricte description géométrique, il faut pour progresser faire intervenir un phénomène physique à savoir les équilibres capillaires dans les espaces poreux. L'étude de ces équilibres permet d'opérer sur l'espace poreux un ensemble de simplifications ouvrant la voie à une quantification plus systématique. Réciproquement ces équilibres capillaires sont, en eux-mêmes, un des points importants de l'étude des corps poreux. En effet, dès que plusieurs fluides coexistent dans un milieu poreux (et c'est le cas dans les réservoirs pétroliers pour l'eau, l'huile, et le gaz, ou dans les couches très superficielles du sol pour l'eau et l'air), ces phénomènes capillaires vont être déterminants dans le comportement physique.

Une des caractéristiques majeures de la plupart des corps poreux est permettre la circulation des fluides. Nous rappellerons les notations de perméabilité absolue (cas d'un corps poreux totalement saturé par un seul fluide) et relative (corps poreux contenant plusieurs fluides non miscible).

On verra aussi que les espaces poreux peuvent poser des problèmes d'échelle. Il existe une échelle apparente absolue du milieu poreux, celle du grain solide constituant le squelette. Mais il faut souvent, pour une meilleure compréhension, substituant à cette échelle absolue la notion d'échelle relative aux phénomènes physiques étudiés, et cette échelle relative peut être for déferente d'un phénomène à l'autre.



**Figure III.3. Exemple de structure poreuse.**

La plupart des propriétés macroscopiques d'un matériau poreux (résistances mécaniques, isolation thermique ou phonique) sont gouvernées par le nombre, la taille et la forme des pores ainsi que leur connectivité. Selon l'IUPAC(\*), la classification des pores en fonction de leur taille est la suivante :

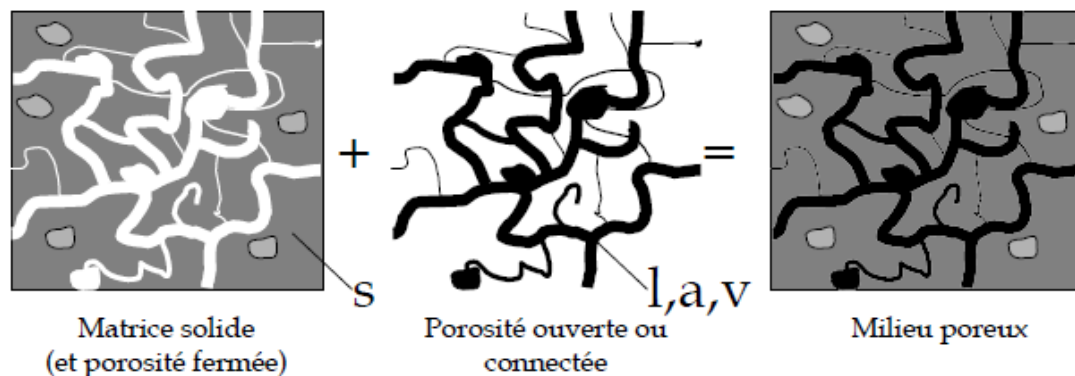
(\*) IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry.

**Tableau III.1. Classification de la porosité selon l'IUPAC(\*).**

Diamètre des pores	Classe
< 2 nm	microporosité
de 2 à 50 nm	mésoporosité
> 50 nm	macroporosité

## III .2.2. Définition d'une porosité : [37]

Selon le glossaire international d'hydrologie, la porosité peut être définie comme étant la propriété d'un milieu, d'un sol ou d'une roche de comporter des pores, c'est à dire des vides interstitiels interconnectés ou non. Elle peut être exprimée comme étant le rapport du volume de ces vides au volume total du milieu. La porosité est donc définie à la fois comme une propriété caractéristique d'un milieu poreux et comme un paramètre qui l'exprime quantitativement (rapport de volumes, sans dimension). D'après cette définition, il est possible de se représenter le défaut de porosité dans un matériau composite comme étant de très petites cavités emprisonnant à priori de la matière gazeuse.



**Figure III.4. Schématisations d'un milieu poreux.**

## III .2.3. Différents types de porosités : [38]

### III .2.3.1. Les porosités ouvertes :

Composées de vide inter communicant connecté à la partie extérieure du matériau :

$$P_o = V_{po} / V_t$$

### III .2.3.2. Les porosités fermées :

Isolées à l'intérieur du matériau et ne permettant aucune perméabilité :

$$P_f = V_{pf} / V_t$$

Avec :

$V_{po}$  : volume de pores ouvert.

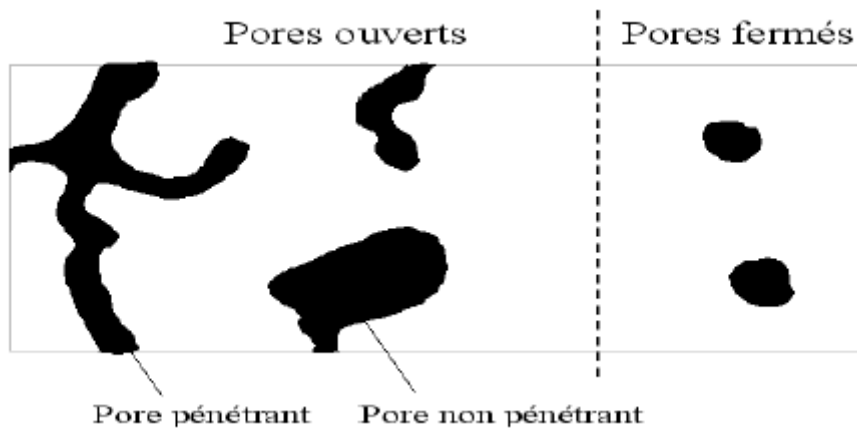
$V_{pf}$  : volume de pores fermé.

$V_t$  : volume totale.

Les relations suivantes existant entre ces différentes grandeurs :

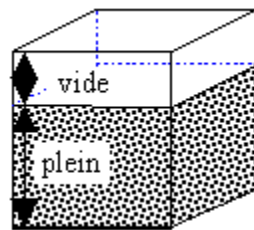
$$V_p = V_{po} + V_{pf}$$

$$P_t = P_o + P_f$$



**Figure III.5. Pores ouverts et fermés.**

En général la porosité est le rapport du volume des vides au volume total.



$$p = \frac{\text{volume des vides}}{\text{volume total}}$$

**Figure III.6. Porosités d'un volume quelconque.**

On peut aussi définir la porosité comme le volume de vide par unité de volume apparent.

## III.2.4. Quelques exemples de milieux poreux : [38]

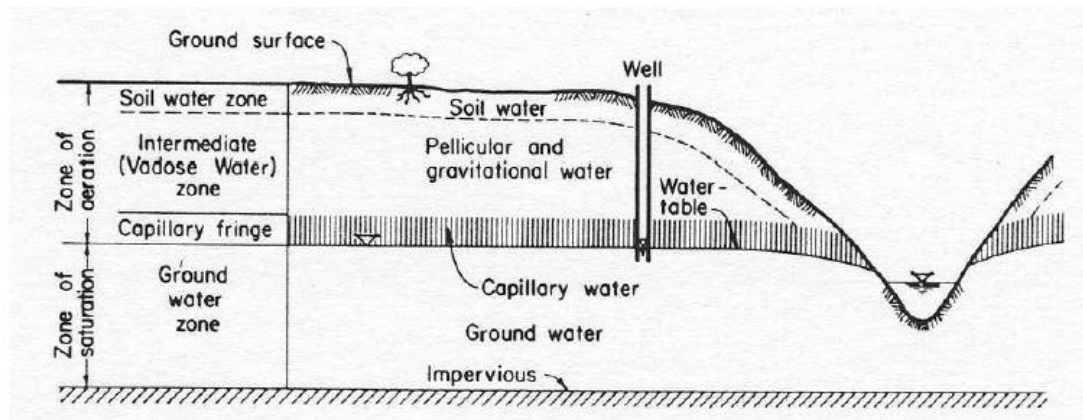
### III.2.4.1. Milieux poreux naturels :

Dans la nature, les roches et les sols sont certainement les milieux poreux les plus exploités. L'étude géologique des sous-sols permet de classifier les différentes couches géologiques selon la perméabilité à un écoulement de fluide. Les couches d'argile constituent en général les parois imperméables de réservoirs naturels d'eau ou d'hydrocarbures. On nomme aquifère un réservoir qui non seulement contient de l'eau mais qui peut aussi être le lieu d'écoulement, par gravité ou par pompage.

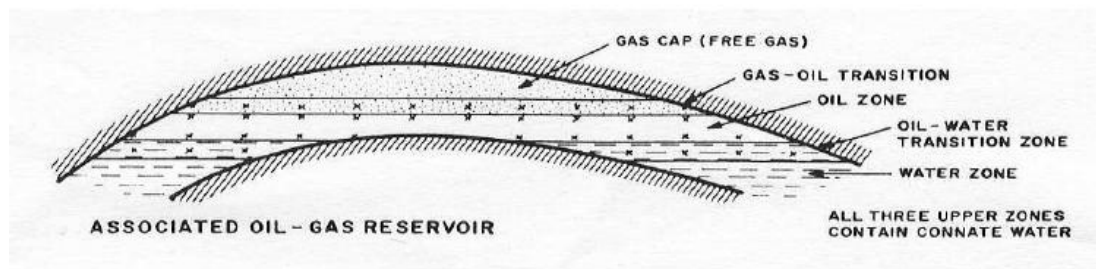
Une schématisation d'un aquifère est proposée sur la (figure III.7).

Les roches poreuses peuvent contenir également des hydrocarbures. La (figure III.8) montre qu'un tel réservoir peut contenir de l'eau, du pétrole et du gaz, avec des couches de mélange intermédiaires. C'est pourquoi la compréhension des écoulements multiphasiques est très importante pour l'industrie de l'extraction pétrolière.

La porosité des roches est très variable selon les conditions de température et de pression lors de la formation et de l'évolution géologique. Les roches denses.

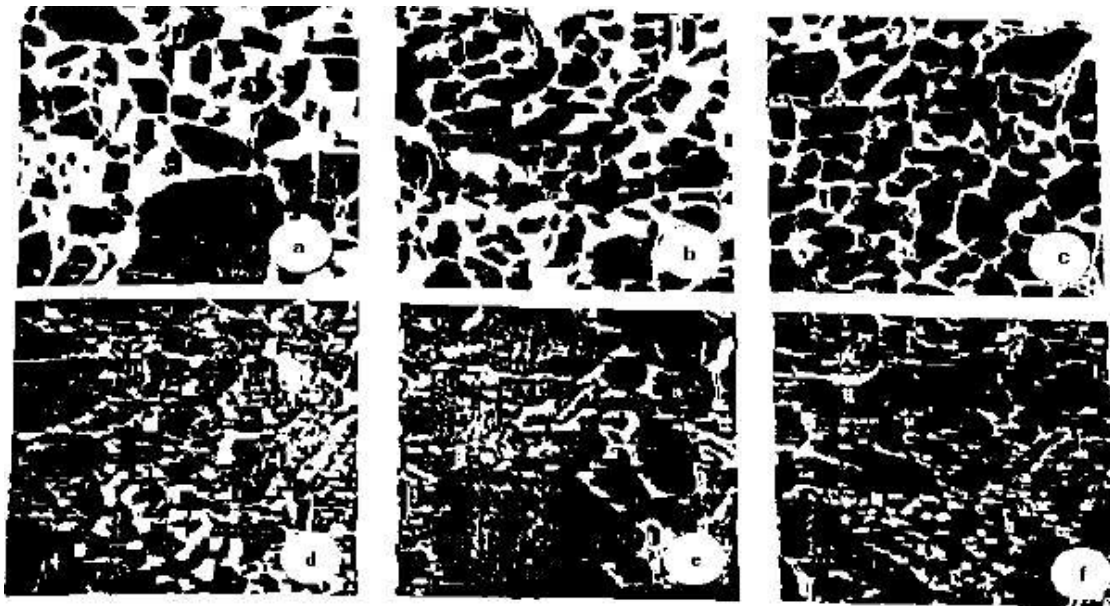


**Figure III.7. Schéma d'un aquifère.**



**Figure III.8. Schéma d'un réservoir naturel d'hydrocarbures.**

Comme le granit ont des porosités inférieures à 2 %. Au contraire, les roches Volcaniques formées à la surface (faible pression) ont des porosités élevées à cause des processus de dégazage associés au refroidissement. Certaines roches atteignent ainsi une porosité de 60 %. Les roches sédimentaires se sont formées à partir d'agglomération de grains ciment entre eux. Les schistes argileux ont une porosité de l'ordre de 10 à 25 %. Le grès, formé en général de grains de quartz, a une porosité qui dépend fortement du matériau de cimentation des grains (entre 10 et 45 %). De plus, la compaction géologique peut réduire considérablement la porosité: la (figure III.9) montre différentes coupes d'échantillons de grès poreux prélevés dans un même forage mais à des profondeurs différentes. On remarque que la porosité diminue nettement avec la profondeur de forage.



**Figure III.9. Coupes d'échantillons de grès poreux obtenues à différentes profondeurs.**

P: (a)  $e = 27 \%$ ,  $P=1000-1500$  m; (b)  $e = 23 \%$ ,  $P=1700-1900$  m; (c)  $e = 18 \%$ ,  
 $P=2000-2300$  m; (d)  $e = 16 \%$ ,  $P=2500-2700$  m; (e)  $e = 13 \%$ ,  $P=2800-3000$  m;  
(f)  $e = 10 \%$ ,  $P > 3000$  m;

### III .2.4.2. Milieux poreux artificiels :

Lors de la fabrication des bétons et des ciments, une certaine porosité est nécessaire pour permettre un séchage lent et progressif et l'obtention d'un matériau robuste. Parfois, la porosité « fine » est complétée par un réseau de fractures qui fragilise le béton. La porosité d'un bon béton est comprise entre 6 et 10 %. Le contrôle de la porosité et de la structure poreuse joue un grand rôle dans l'industrie du papier. Selon les méthodes de fabrication, on peut obtenir un papier filtre très absorbant avec une porosité de 80 %, ou au contraire un papier très « serré » et transparent (le papier calque) avec une porosité proche de 0. On a alors des pores de diamètres compris entre 0,2 à 4  $\mu\text{m}$ . Une méthode de réalisation de poreux de formes diverses est le frittage. Un empilement de grains en contact est chauffé de manière à ce que les contacts entre grains fondent et réalisent une soudure. Le frittage peut se réaliser avec des grains en métal (bronze, cuivre par exemple), en plastique ou en verre.

### III .2.5. Micro-éléments : [39]

Tous les matériaux de construction sont des mélanges d'un certain nombre de composés chimiques constitués de molécules. Ces composés cristallisent sous des formes qui leur sont propres ou se solidifient, à partir de l'état de fusion, en donnant naissance à des particules amorphes qui constituent les micro-éléments. Ces derniers sont les blocs physiques dont se composent tous les matériaux de construction.

Ces blocs doivent donc, par leurs dispositions et leurs liaisons, déterminer les propriétés physiques et mécaniques des corps. Examinés sous grossissement 10,000 - ce qui permet l'observation des microstructures - ils révèlent ordre, complexité et grande variété. Les matériaux de construction contiennent un grand nombre de composés divers; aussi comprennent-ils une gamme de systèmes cristallins présentant des éléments de formes variées, parmi lesquelles figurent des cubes, des lames, des aiguilles et des tubes; ils contiennent également des particules amorphes, c'est-à-dire ne présentant aucune forme spécifique. Un matériau donné se compose ordinairement d'un mélange de plusieurs corps, c'est-à-dire de particules présentant des formes et des dimensions extrêmement variées.

### **III.2.6. Les Liaisons : [39]**

La microstructure d'un matériau résulte de l'assemblage des micro-éléments qui le composent. Si cet assemblage constitue un corps résistant, il existe nécessairement entre les éléments une liaison puissante. Les liaisons sont parfois de nature chimique; tel est le cas pour les liaisons qui existent dans les molécules des polymères et augmentent considérablement la résistance de ces derniers. Dans d'autres cas, les surfaces extérieures des cristaux s'unissent au cours de la croissance de ces derniers et donnent naissance à de solides liaisons. Le cas se présente pour les métaux, et, dans une certaine mesure, pour les plâtres. Le plus souvent (dans les systèmes ordinaires de cimentation) le lien existant n'est autre que la simple attraction physique qui s'exerce entre deux solides; elle est connue sous le nom de force de Van der Waal; l'extrême proximité des atomes des surfaces adjacentes suffit alors à assurer la liaison.

Lorsque les dimensions des micro-éléments décroissent et que la surface totale croît, la surface de contact étroit augmente. Lors de l'hydratation du ciment Portland, une forte action de cimentation prend naissance à cause des très petites dimensions des particules engendrées par le processus d'hydratation. Dans un espace restreint, la forte augmentation de surface rapproche les surfaces adjacentes dans une mesure telle qu'il en résulte des liens puissants. On peut unir des particules très fines à l'état sec et en former un corps solide et rigide, si on les comprime assez pour réduire considérablement leurs distances réciproques.

### **III .2.7.La Microstructure : [39]**

Lors de la formation d'un matériau, ses propriétés physiques et mécaniques dépendent de divers facteurs; ce sont la nature des micro-éléments, les dimensions et les formes de ces derniers, le type de leur formation autour d'un noyau et de leur croissance, la nature des frontières formées par l'interférence des surfaces en croissance, l'aire de ces frontières, et l'étendue des surfaces non contiguës laissant entre elles les vides qui sont à l'origine de la porosité.

### III.2.8. Pourcentage de la porosité de quelques matériaux : [39]

Chez les métaux, chez certaines céramiques spéciales et certaines roches, les frontières existant entre les grains de matière sont continuées; la tension qui s'exerce sur le matériau est répartie proportionnellement et uniformément sur les micro-éléments individuels (Figure III.10). D'une manière similaire, une microstructure formée à partir de cristaux ou de particules dont les croissances interfèrent aux points de contact, ou qui sont unis par fusion, représente un matériau potentiellement fort si l'aire de l'interface frontalière est grande (Figures III.11 et III.12). Il n'a pas été possible d'identifier les effets produits, sur chacune des propriétés finales des matériaux, par chacun des nombreux facteurs qui influent sur la formation d'une microstructure.



**Figure III.10. Cristaux de quartz, système non poreux (aimablement communiquée par Sperry Rand Research Center) .**

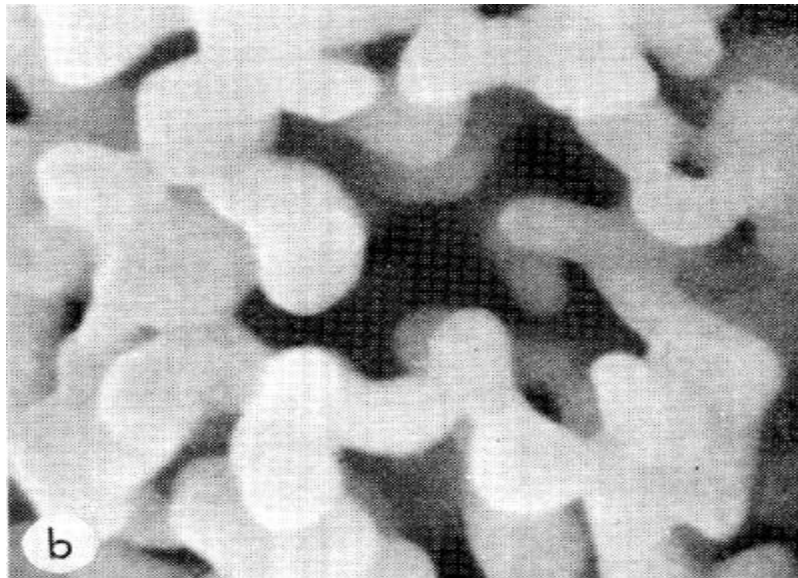


Figure III.11. Brique, argile frittée, porosité 40 pour cent.

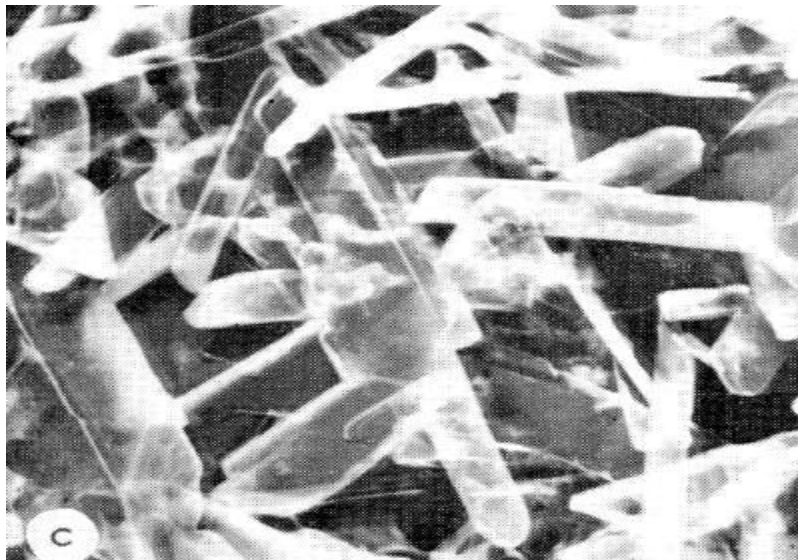


Figure III.12. Gypse hydraté formé de plâtre de Paris et d'eau, porosité 60 pour cent.



Figure III.13. Ciment, hydraté porosité 30 pour cent.

### III.3. La relation entre la compacité et la porosité :

La porosité et la compacité sont liées par la relation:

$$P + C = 1$$

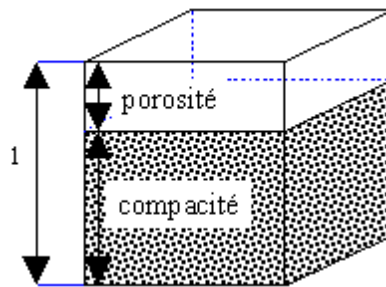


Figure III.14 volume unitaire.

La porosité et la compacité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égale à 100%. En effet:

$$p+c = \frac{\text{volume des vide}}{\text{volume total}} + \frac{\text{volume des plains}}{\text{volume total}} + \frac{\text{volume total}}{\text{volume total}} = 1$$

### III.4. La densité des matériaux :

#### III.4.1. Histoire et terminologie : [40]

La densité d'un corps est une notion de physique ancienne, Cette grandeur caractéristique d'un corps, exprimée par un nombre sans dimension à un usage commun. Elle est souvent définie dans les dictionnaires savant ou encyclopédique

#### III.4.2. Définition : [41]

La masse volumique est définie comme le quotient de la masse et du volume d'un matériel :

Généralement le symbole pour la masse volumique est  $\rho$ , mais comme ce symbole est également utilisé pour les résistivités, nous utiliserons donc  $d$ , et le terme densité en lieu et place de masse volumique.

L'unité SI pour la densité est le  $\text{Kg/m}^3$  avec  $1 \text{ g/cm}^3 = 10^3 \text{ Kg/m}^3$

Du fait de l'hétérogénéité des roches, il est nécessaire de distinguer entre les différentes densités relatives aux divers composants qui constituent le matériel appelé roche :

$d$  = la densité globale, c'est-à-dire la densité moyenne d'un volume de roche, par exemple la densité des grès

$d_i$  = la densité des minéraux qui sont des composants de la roche, par exemple la densité du quartz

$d_m$  = La densité de la matrice qui est la densité de la partie solide de la roche, par exemple la densité de la matrice calcaire

$d_w$  = la densité du fluide qui remplit les pores de la roche, par exemple la densité de l'eau

Pour une roche poreuse et saturée, on peut écrire :

$$d = 1 - \varphi + \varphi d_f$$

$\varphi$ : porosité totale.

### III .4.3.Expression de la densité :

La densité, notée  $d$ , s'exprime de la sorte :

$$d = \frac{\rho_{\text{corps}}}{\rho_{\text{ref}}}$$

Où  $\rho_{\text{corps}}$  est la masse volumique du corps considéré, et  $\rho_{\text{ref}}$  est la masse volumique du corps de référence.

La densité des gaz est calculée à partir de la densité de l'air. La valeur de référence prise est la masse d'un litre d'air à 0 °C.

$$d_{\text{gaz}} = \frac{\rho_{\text{gaz}}}{\rho_{\text{air}}}$$

L'expression de la densité des gaz est :

### III .4.4.La densité des Minéraux et fluide :

Il existe de nombreuses tables donnant les densités des minéraux. Pour les plus courants des minéraux, la densité varie de 2,2 à 3,5 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>. Citons quelques-uns des minéraux les plus courants :

- ✓ Le quartz : 2,648 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>
- ✓ La calcite : 2,710 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>
- ✓ La dolomite : 2,866 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>
- ✓ L'anydrite : 2,963 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>
- ✓ La halite : 2,163 10<sup>3</sup> kg/ m<sup>3</sup>

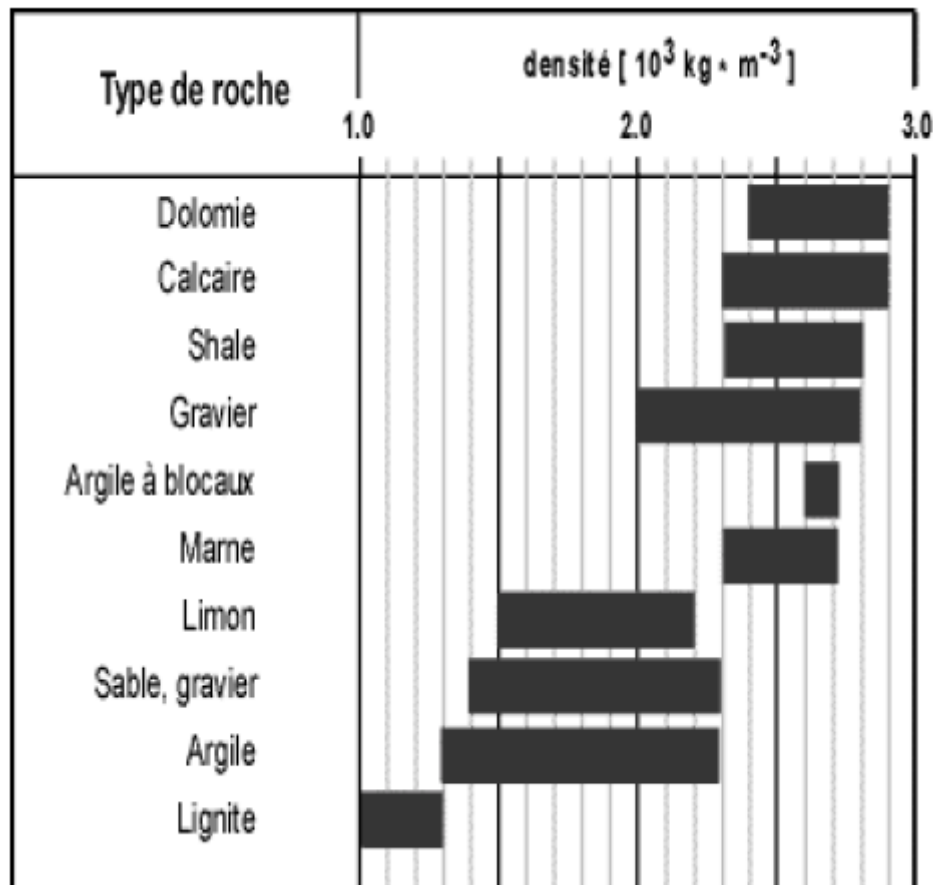
La densité des liquides et des gaz est contrôlée par la composition chimique ainsi que par la température et la pression. Pour les liquides, Schlumberger donne les valeurs moyennes suivantes :

- ✓ Eau douce : 1,000 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Eau salée : 1,146 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Pétrole (huile) : 0,85 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>
- ✓ Air, Gaz : 0,0013 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup>

## III .4.5.La densité des Roches : [42]

Pour les roches ignées et la plupart des roches métamorphiques la porosité est relativement faible et peut être ignorée. La densité des ces roches va donc dépendre principalement des minéraux les constituant, elle varie entre 2,6 et 3,4  $10^3 \text{ Kg/m}^3$ . La pression joue un rôle au début car les pores et les fractures se ferment lorsque la pression augmente et la densité augmente puis très rapidement elle reste stable.

Pour les roches sédimentaires, qui sont les principaux réservoirs, la densité varie beaucoup plus :



**Figure III.15.Densité des principales roches sédimentaires (d'après Wohlenberg, 1982).**

Pour les sédiments non consolidés, comme les sols ou les sables, la densité peut descendre lorsqu'ils sont secs jusqu'à des valeurs beaucoup plus faibles de 1,3  $10^3 \text{ Kg/m}^3$ . Une autre caractéristique des sédiments poreux c'est leur relative compressibilité, ce qui a pour conséquence que leur densité varie avec la profondeur et donc la pression. Cette relation n'est pas linéaire et atteint une valeur asymptotique pour les grandes profondeurs (environ 2 Km).

## *CHAPITRE IV*

### *Les caractéristiques des matériaux*

**CHAPITRE IV : Caractéristique des matériaux****IV.1.Introduction:**

Les bétons sont des matériaux de construction qui contiennent du ciment, de l'eau, du sable, des granulats. Ils peuvent être très différents les uns des autres selon la nature, les pourcentages des constituants, le malaxage et la mise en œuvre.

Le béton est constitué de : (voir la photo IV.1)

- liant (ciment),
- eau,
- sable,
- granulats,
- les polystyrènes,
- L'eau de gâchage.



**Photo IV.1.les constitué de béton.**

**IV.1.1. Les liants :(ciment)**

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous forme de poudre minérale s'hydratant en présence d'eau. Il forme une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement à l'air. C'est le constituant fondamental du béton puisque c'est lui qui joue le rôle de cohésion des différents constituants.

Généralement, on peut utiliser:

- les ciments normalisés (gris ou blanc),
- les ciments spéciaux (alumineux fondu, prompt, ..)
- les liants à maçonner,
- les chaux hydrauliques naturelles.

Le ciment utilisé pour la préparation du béton est de type CPJ-CEMII dans la classe 42,5.

### IV.1.2. Les sables :

Les sables utilisés sont les sables appelés “sable normalisé”. Les sables de bonne granulométrie doivent contenir des grains fins, moyens et gros. Les grains fins se disposent dans les interstices entre les gros grains pour combler les vides. Ils jouent un rôle important: ils réduisent les variations volumiques, les chaleurs dégagées. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume de sable humide.

Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ..), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.
- spéciaux (lourds, réfractaires, légers):
- sable de laitier;
- sable d'oxydes de fer, de chromite;
- sable de briques concassées.

Certains sables sont à éviter, notamment les sables très fins, les sables crus qui manquent de fines et les sables de dunes ou de mer qui contiennent des sels néfastes pour les constituants des ciments, par contre ils doivent être propres.

Le diamètre maximum des grains de sable utilisé pour les mortiers est:

- extra- fins: jusqu'à 0,8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- fins: jusqu'à 1,6 mm;
- moyens: jusqu'à 3,15 mm;
- gros: jusqu'à 5 mm.

Le sable que nous avons utilisé de nature roulée pour notre béton provient de l'Oued MAITAR de BOUSSAÂDA de diamètre maximum de 5 mm.

### IV.1.3. Les granulats :

Les granulats doivent avoir une bonne granulométrie dans le diamètre varie de plus petit au plus gros.

Ils peuvent être:

- naturels et roulés (de rivières, de sablières, ...), de nature siliceuse ou silico-calcaire;
- naturels concassés (roches de carrières), comme des basaltes, porphyres, quartzites. Ils sont anguleux et durs.

Les granulats peuvent se classer selon les diamètres:

- petits: de 3 à 8 mm (en tamis), soit 1 mm (en passoire);
- moyens: de 8 à 15 mm;
- gros: de 15 à 25 mm;
- très gros: de 25 à 40 mm.

Les granulats que nous avons utilisés, sont de natures concassées et proviennent de la roche d'une carrière située à 25 km de M'SILA, en allant vers B.B.A (carrière COSIDER). Leur diamètre varie de 3 à 8 mm et de 8 à 15 mm.

#### **IV.1.4. Les polystyrènes :**

Le polystyrène est obtenu par polymérisation du styrène en présence de pentane (agent d'expansion), auquel sont ajoutés eau et adjuvant.

#### **IV.1.5. L'eau de gâchage :**

L'eau de gâchage utilisé est une eau de robinet du laboratoire de département de génie civil.

### **IV.2. Analyse Granulométriques : (NF P 18-560 [42])**

La composition du béton a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (ciment, eau, sable, graviers) en produisant un béton dont l'ouvrabilité est compatible avec les moyens de mise en œuvre et qui possédera, après durcissement, les meilleures caractéristiques (bonne étanchéité, bonne résistance mécanique, faible retrait, bonne durabilité...).

Pour définir ces proportions, on doit passer tout d'abord à l'essai de l'analyse granulométrique puis choisir une méthode de composition de béton parmi celles proposées par des spécialistes tels que Bolomey, Faury, Vallette, Dreux-Gorisse, Joisel ...etc.

L'analyse granulométrique sert à déterminer la distribution en poids des particules d'un matériau suivant leurs dimensions.

#### **IV.2.2. Principe de l'essai :**

L'essai consiste à fractionner, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs catégories de grains décroissantes.

#### **IV.2.3. Équipements utilisés :**

Pour réaliser cette opération, nous avons utilisé les équipements suivants :

- une étuve thermo statée, (voir photo IV.2)
- une balance de 5 kg, pesant au gramme près, (voir photo IV.3)
- un vibro- tamis électrique. (voir photo IV.4)
- des tamis de différents diamètres, (voir photo IV.5)
- un échantillon de 2000 g pour chaque matériau.



Photo IV.2. Une étuve thermo statée.



photo IV.3. Une balance.



Photo IV.4. Un vibro-tamis électrique.



photo IV.5. Des tamis de différents diamètres.

#### IV.2.4. Description de l'essai :

Les granulats utilisés pour préparer le béton sont de forme roulée et concassé leur diamètre est de sable (0/5), gravie (3/8) et gravie (8/15). Une fois ces matériaux lavés, ils seront ensuite séchés pendant 72 heures à l'étuve à une température maximale de 105 °C. On emboîte les tamis les uns sur les autres dans un ordre décroissant du front de la colonne vers le bas. En partie inférieure, on dispose d'un fond étanche qui permettra de récupérer les fillers. Un couvercle sera disposé en haut de la colonne afin d'interdire toute perte de matériau pendant le tamisage. On appellera tamisât le poids de matériau passant à travers un tamis donné et refus le poids de matériau retenu par ce même tamis.

Le matériau étudié est versé en haut de la colonne de tamis et celle -ci est vibrée à l'aide de la tamiseuse électrique. On considère que le tamisage est terminé lorsque le refus ne varie pas. Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit  $R_1$ , la masse de ce refus. Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé avec le refus précédent. Soit  $R_2$ , la masse des deux refus. Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes. Ceci permet de connaître la masse des refus cumulé  $R_n$ , aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé. Les résultats des différents tamisages sont présentés dans les tableaux suivants:

**Tableau IV.1. Analyse granulométrique pour le gravier (3/8).**

Dimension des tamis (en mm)	Refus (en g)	Refus cumulé (en g)	Refus cumulé (en %)	Tamisé cumulé (en %)
8	28	28	1,4	98,6
6,3	356	384	19,2	80,8
5	409	793	39,65	60,35
4	53	1323	66,15	33,85
3,15	435	1758	87,9	12,1
2,5	182	1940	97	3
Fond	59	1999	99,95	0,05

**Tableau IV.2. Analyse granulométrique pour le gravier (8/15).**

Dimension des tamis (en mm)	Refus (en g)	Refus cumulé (en g)	Refus cumulé (en %)	Tamisé cumulé (en %)
16	6	6	0,3	99,7
12,5	466	472	23,6	76,4
10	931	1403	70,15	29,85
8	528	1931	96,55	3,45
6,3	56	1987	99,35	0,65
5	1	1988	99,4	0,6
Fond	12	2000	100	0

**Tableau IV.3. Analyse granulométrique du sable.**

Dimension des tamis (en mm)	Refus (en g)	Refus cumulé (en g)	Refus cumulé (en %)	Tamisé cumulé (en %)
5	1	1	0,1	99,9
2,5	26	27	2,7	97,3
1,25	99	126	12,6	87,4
0,63	191	317	31,7	68,3
0,315	457	774	77,4	22,6
0,16	171	945	94,5	5,5
0,08	48	993	99,3	0,7
Fond	6	999	99,9	0,1

### IV.2. 5. Module de finesse du sable: (NF P 18-561 [43])

C'est un facteur très important, qui nous permet de juger la grosseur du sable. Il est exprimé par le rapport de la somme des refus cumulés des tamis de mailles : 0,16 – 0,315 – 0,63 – 1,25 – 2,5 et 5(mm) sur 100 et calculé par la relation suivante :

$$M_f \text{ d'un sable} = \sum \frac{R_c}{100} = \frac{0,16+0,315+0,63+1,25+2,5+5 \text{ mm}}{100}$$

$$M_f = \frac{94,5+77,4+31,7+12,6+2,7+0,1}{100} = 2,19$$

Tableau IV.4.les normes soviétiques spécifient de MF des sables.

		Fuseaux	Module de finesse
Sables admissibles	Préférentiel	A	2,20 à 2,80
	Un peu trop fin	B	1,80 à 2,20
	Un peu trop grossier	C	2,80 à 3,20

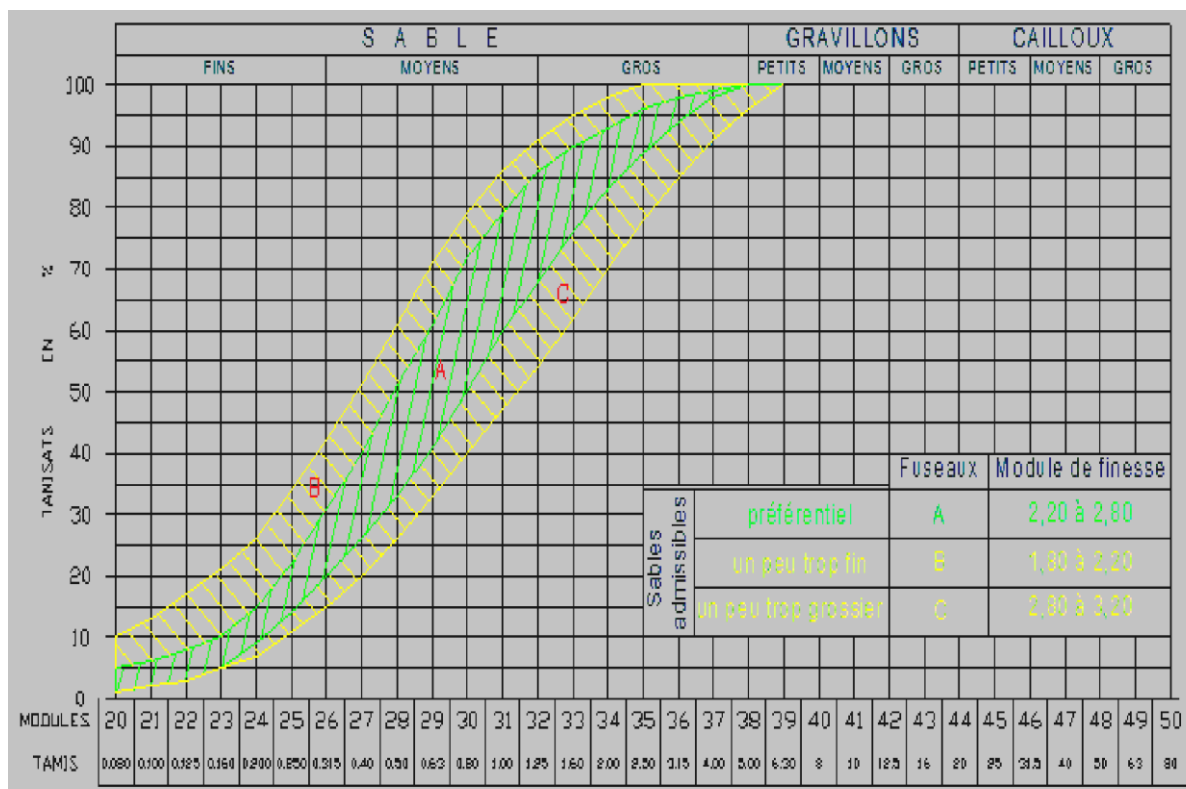


Figure IV.1.les normes soviétiques spécifient de MF des sables.

$$2,80 < M_f = 2,19 < 2,20$$

On peut noter que c'est sable un peu trop fin qui correspond à des sables à utiliser pour la recherche de résistances élevées.

### IV.2.6. Courbe Granulométrique :

Les valeurs données sur les différents tableaux ci-dessus nous permettent de tracer les courbes granulométriques pour chaque type de granulats, (voir figure IV.1).

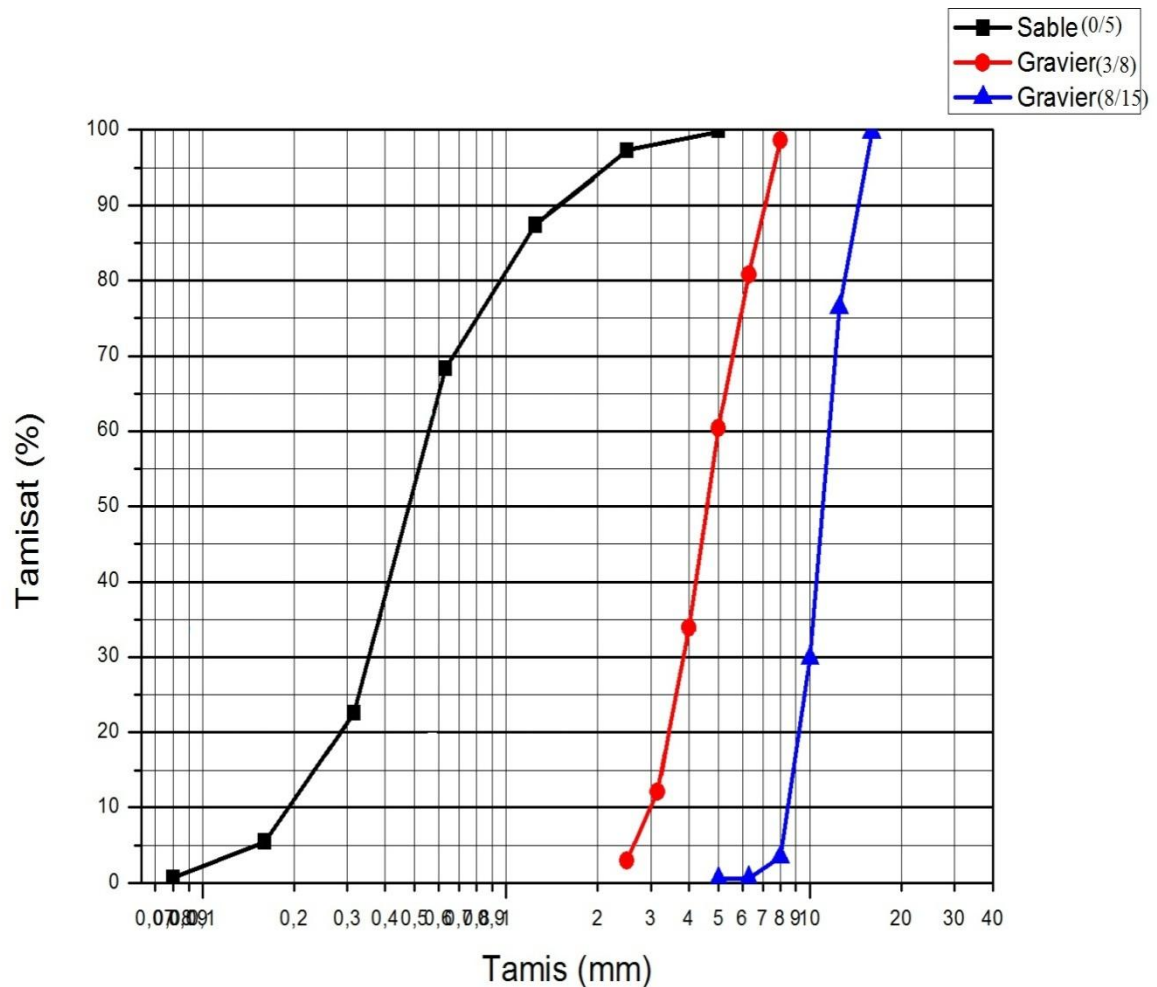


Figure IV.2. Courbe Granulométrique .

### IV.3. Les caractéristiques physiques des matériaux :

#### IV.3.1. Sable (0/5) :

##### IV.3.1.1. Équivalent de sable (N F 18-598 [44])

Selon la norme N F 18-598 qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai.

Cet essai nous permet de mettre en évidence la proportion d'impuretés argileuses qui diminuent la qualité des bétons et provoquent des gonflements et des retraites.

##### IV.3.1.1. 2. Matériels utilisés : (voir photo II.6)

- Éprouvettes cylindriques, en matière plastique, transparentes avec deux traits de repères.
- Un bouchon de caoutchouc pour fermer l'éprouvette.
- Un tube laveur et un entonnoir.
- Un flacon.

- Piston taré à masse coulissante de 1 kg.
- Une machine d'agitation électrique, capable d'imprimer à l'éprouvette un mouvement horizontal, rectiligne, sinusoïdal, de 20 cm d'amplitude, 90 fois aller et retour en 30 secondes. [45]



**Photo IV.6. Matériels utilisés pour Équivalent de sable.**

#### **IV.3.1.1.3 Mode opératoire :**

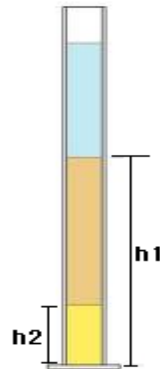
- prendre une pesée de 120 g de sable.
- remplir l'éprouvette de solution lavant jusqu'au premier repère.
- a l'aide l'entonnoir verser la prise d'essai dans l'éprouvette et taper fortement à plusieurs reprises avec la paume de main a fin de chasser les bulles d'air.
- laisser reposer pendant 10 minutes.
- fermer l'éprouvette à l'aide du bouchon en caoutchouc et lui imprimer 90 cycles de 20 cm de course horizontale en 30 secondes à la main à l'aide d'un agitateur mécanique.
- retirer le bouchon, le rincer avec la solution lavant au dessus de l'éprouvette, rincée ensuite les parois de cette dernière.
- faire seconder le tube laveur dans l'éprouvette, le rouler entre le pouce et l'index en faisant tourner lentement le tube et l'éprouvette et en imprimant en même temps au tube un léger piquage, cette opération a pour but de laver de sable et de faire monter les éléments fins et argileux.

#### **a. équivalent de sable visuel (ESV) : (voir Figure IV.3.)**

- Après 20 minutes de dépôt de sable, lire la hauteur  $h_1$  du niveau supérieure du floculant jusqu'au fond de l'éprouvette à l'aide d'une réglette.
- Mesurer également avec la règle la hauteur  $h_2$  comprise entre le niveau supérieur de la partie sédimentaire. Et le fond de l'éprouvette.

Est déterminée par **la formule** suivante :

$$\text{ESV} = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad [\%]$$



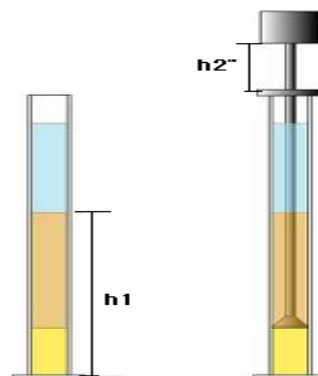
**Figure IV.3. Équivalent de sable visuel (ESV).**

**b. équivalent de sable avec de piston (ESP) : (voir Figure IV.4.)**

- Introduire le piston dans l'éprouvette et laisser descendre jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. A cet instant bloquer le manchon du piston et sortir celui-ci de l'éprouvette.
- Introduire le régleur dans l'encoche de piston jusqu'à ce que le zéro vienne buter contre la face intérieure de la tête du piston. Soit  $h'_2$  la hauteur lue et correspondant à la hauteur de la partie sédimentée.

Est déterminée par **la formule** suivante :

$$\text{ESP} = \frac{h'_2}{h_1} \times 100 \quad [\%]$$



**Figure IV.4. Équivalent de sable avec de piston (ESP).**

**IV.3.1.1.4. Les résultats :**

Le résultat de l'équivalent de sable est présenté dans le tableau suivant:

**Tableau IV.5. Équivalent de sable.**

N° d'essai	$h_1$ (cm)	$h_2$ (cm)	$h'_2$ (cm)	ESV(%)	ESV moyenne (%)	ESP(%)	ESP moyenne (%)
1	12,8	9,9	9,8	77,34	78,55	76,56	76,216
2	14,3	11,3	11	79,02		76,92	
3	14,5	11,5	10,9	79,31		75,17	

**IV.3.1.1.5. Les normes soviétiques spécifient d'Équivalent de sable :****Tableau IV.6. Les normes soviétiques spécifient d'Équivalent de sable . [46]**

E.S.V	E.S.P	Nature et qualité du sable
$E.S.V < 65$	$E.S.P < 60$	Sable argileux : risque de retrait ou de gonflement à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq E.S.V < 75$	$65 \leq E.S.P < 70$	Sable légèrement argileux de propriété admissible pour des bétons de qualité courante quand on ne craint pas particulièrement le retrait
$75 \leq E.S.V < 85$	$70 \leq E.S.P < 80$	Sable propre à faible pourcentage de farine argileux convient parfaitement pour des bétons de haute qualité
$E.S.V > 85$	$E.S.P > 80$	Sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par augmentation du dosage en eau

On a :

$$ESV (\%) = 78,55\% \quad 75 \leq ESV < 85$$

$$ESP (\%) = 76,216\% \quad 70 \leq ESP < 80$$

C'est un sable très propre : l'absence totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

**IV.3.1.2. Masses volumiques absolues : NF P 18-555 [47]**

C'est la masse de l'unité de volume absolue du corps, c'est -à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides.

**IV.3.1.2.2. Principe:**

Le volume absolu d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide(en général de l'eau) que déplace l'introduction de ce corps.

## IV.3.1.2.3. Matériel :

- des éprouvettes graduées. (voir photo IV.7).
- Une balance de précision : force de 4 à 5 kg. (Voir photo IV.3).



Photo IV.7. Une éprouvette graduée.

## II.3.1.2.4. Mode opératoire : (voir Figure IV.5)

- Mettre dans une éprouvette graduée un volume ( $V_1$ ) d'eau.
- Peser une masse ( $M$ ) du matériau (sable), et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume ( $V_2$ ).

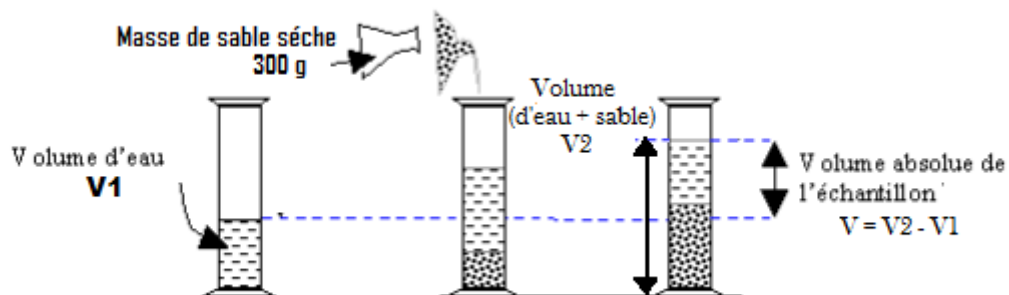


Figure IV.5. Détermination de la masse volumique absolue du sable.

## IV.3.1.2.5. La formule :

- Il est recommandé de faire 3 essais et de prendre la moyenne.
- Le volume absolu est  $V = V_2 - V_1$  et la masse volumique absolue est :

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

**IV.3.1.2.6.Les résultats :**

Les résultats de la masse volumique absolue des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.7. Masses volumiques absolues du sable.**

	N d'essai	La masse (g)	Volume <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	Volume <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ab}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ab}$ (moyenne) (g/cm <sup>3</sup> )
Sable (0/5)	1	300	200	319	2,52	2,55
	2	300	200	318	2,54	
	3	300	200	315	2,60	

**IV.3.1.3.Masses volumiques apparent du sable: NF P 18-555 [47]**

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est -à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

**IV.3.1.3.2.Principe:**

Remplir une mesure de récipient ; et en déterminer la masse.

**IV.3.1.3.3.Résultats :**

- Il est recommandé de faire 3 essais et de prendre la moyenne.
- Le masse apparent est  $M = M_2 - M_1$  et la masse volumique apparent est :

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{g/cm}^3) \quad [48]$$

**IV.3.1.3.4.Matériel :**

- Une mesure de volume récipient vide (V) :
- Pour le sable : le volume de récipient(V)=900 cm<sup>3</sup> (voir photo IV.8).
- Une règle à araser. (voir photo IV.9).
- Une balance de précision : force de 4 à 5 kg. (voir photo IV.3).
- un entonnoir monté sur trépied (voir photo IV.10). [49]



**Photo IV.8.**  
**Un récipient.**



**Photo IV.9.**  
**Une règle a arasé.**



**Photo IV.10.**  
**Un entonnoir.**

**IV.3.1.3.5.Mode opératoire : (voir photo IV.11)****IV.3.1.3.5.1.Masse volumique apparent à l'état lâche :**

- Peser la mesure du récipient vide ( $M_1$ ).
- Prendre le sable dans un entonnoir monté sur trépied.
- Verser ainsi le sable, toujours au centre de la mesure, jusqu'à ce qu'il déborde tout autour en formant un cône.
- Araser à l'aide d'une règle le récipient.
- Peser le contenu ( $M_2$ ).

**IV.3.1.3.5.2.Masse volumique apparent à l'état compact :**

- Peser la mesure du récipient vide ( $M_1$ ).
- Prendre le sable dans un entonnoir monté sur trépied.
- Verser ainsi le sable, toujours au centre de la mesure, après avoir rempli le premier un tiers on compact (pour éviter les vides), on remplit la deuxième un tiers et on compacte, puis on remplit le troisième un tiers et on compacte.
- Araser à l'aide d'une règle le récipient.
- Peser le contenu ( $M_2$ ).

**Photo IV.11. Masses volumiques apparent pour le sable.****IV.3.1.3.6.Résultats :**

Les résultats de la masse volumique apparente de sable sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.8 la masse volumique apparent du sable.**

	L'état d'essai	N d'essai	La masse $_1$ (g)	La masse $_2$ (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{app}$ (moyenne) (g/cm <sup>3</sup> )
Sable	État lâche	1	115	1520	900	1,561	1,550
		2	115	1500	900	1,539	
		3	115	1511	900	1,551	
	État compact	1	115	1599	900	1,649	1,659
		2	115	1612	900	1,663	
		3	115	1615	900	1,667	

**IV.3.1.4. La porosité du sable:**

La porosité est le rapport du volume vide au volume total.

Elle est définie aussi comme le volume de vide par unité de volume apparent, peut être déterminée par la formule suivante :

**IV.3.1.4.2. Formulation :**

a- à l'état lâche :

$$p = \frac{V_V}{V} = \left(1 - \frac{\rho_{app\text{ lâche}}}{\rho_{ab}}\right) * 100 \quad (\%)$$

b- à l'état compacte :

$$p = \frac{V_V}{V} = \left(1 - \frac{\rho_{app\text{ compact}}}{\rho_{ab}}\right) * 100 \quad (\%)$$

**IV.3.1.4.3. Résultats :**

Les résultats de la porosité des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.9. La porosité du sable.**

	L'état d'essai	$\rho_{ab}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	P(%)
Sable (0/5)	État lâche	2,53	1,550	38,735
	État compact	2,53	1,659	34,427

**IV.3.1.5. compacité du sable:**

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

**IV.3.1.5.2. Formulation :**

La compacité donnée la formule :

a- à l'état lâche :

$$C = \frac{V - V_V}{V} = 1 - \frac{V_V}{V} = \frac{\rho_{app\text{ lâche}}}{\rho_{ab}} * 100 = 1 - P \quad (\%)$$

b- à l'état compacte :

$$C = \frac{V - V_V}{V} = 1 - \frac{V_V}{V} = \frac{\rho_{app\text{ compact}}}{\rho_{ab}} * 100 = 100 - P \quad (\%)$$

**IV.3.1.5.3. Résultats :**

Les résultats de la compacité des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.10. Compacité du sable.**

	L'état d'essai	$\rho_{ab}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	C(%)
Sable (0/5)	État lâche	2,53	1,550	61,265
	État compact	2,53	1,659	65,573

**IV.3.1.6. indice des vides du sable:****IV.3.1.6.1. Formulation:**

Indice du vide donné par la formule :

a- à l'état lâche :

$$I = \frac{P_{\text{lâche}}}{C_{\text{lâche}}}$$

b- à l'état compacte :

$$I = \frac{P_{\text{compacte}}}{C_{\text{compacte}}}$$

**IV.3.1.6.2. Résultats :**

Les résultats de l'indice des vides des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.11. Indice des vides du sable.**

	L'état d'essai	P (%)	C (%)	I
Sable (0/5)	État lâche	38,735	61,265	0,632
	État compact	34,427	65,573	0,525

**IV. 3.1.7. Teneur en eau (NF P 18-555 [47])**

Le sable a la capacité devenir une grande quantité d'eau. Si son humidité est comprise entre 0 et 3% on le considère comme un sable sec.

**IV.3.1.7.2. Mode opératoire :**

- Peser un échantillon de sable humide, soit  $M_h$  son poids
- mettre le sable dans l'étuve à une température de 100°C environ, et cela pour 24 heures.
- Peser l'échantillon de nouveau, soit  $M_s$  son poids

**IV.3.1.7.3. Formulation :**

La teneur en eau donnée la formule :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (\%)$$

Ou :

$M_h$  : Poids du sable humide.

$M_s$  : Poids du sable sec.

**IV.3.1.7.4.Résultats :**

Les résultats de la teneur en eau des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.12. La teneur en eau du sable.**

	N d'essai	La masse humide (g)	La masse sec (g)	w (%)	w(moyenne) (%)
Sable (0/5)	1	200	199,58	0,210	0,244
	2	200	199,35	0,236	
	3	200	199,43	0,286	

**IV.3.1.8. Degré d'absorption d'eau : (NF P 18-555 [47])**

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorption et de retenir l'eau.

**IV.3.1.8.2.Mode opératoire :**

- Peser un échantillon de sable sec, soit  $M_s = 300\text{g}$  sa masse.
- Immerger l'échantillon testé dans un bac plein d'eau pendant 24heurs à  $20^\circ\text{C}$ .
- Peser l'échantillon de nouveaux ; soit  $M_h$  sa masse.

**IV.3.1.8.3.Formulation :**

Le degré d'absorption d'eau est donné par la formule :

$$\text{Abs} = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) * 100 \quad (\%)$$

**IV.3.1.8.4.Résultats :**

Les résultats de la teneur en eau des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.13. La Degré d'absorption d'eau du sable.**

	N d'essai	$M_s(\text{g})$	$M_h(\text{g})$	Abs(%)	Abs(moyenne) (%)
Sable (0/5)	1	200	204	2,00	2,398
	2	200	204,50	2,25	
	3	200	205,89	2,945	

**IV.3.2. Gravier (3/8) et (8/15):****IV.3.2.1. Masse volumique absolues des graviers: (NF P 18-554 [50])**

C'est la masse de l'unité de volume absolue du corps, c'est -à-dire de la matière qui constitue le corps, sans tenir compte du volume des vides.

**IV.3.2.1.2.Principe:**

Le volume absolu d'un corps est généralement déterminé en mesurant le volume d'un liquide(en général de l'eau) que déplace l'introduction de ce corps.

## IV.3.2.1.3. Matériel :

- des éprouvettes graduées. (voir photo IV.7) .
- Une balance de précision : force de 4 à 5 kg. (Voir photo IV.3) .

## IV.3.2.1.4. Mode opératoire : (voir Figure IV.6)

- Mettre dans une éprouvette graduée un volume ( $V_1$ ) d'eau.
- Peser une masse ( $M$ ) du matériau (gravier) et l'introduire dans l'éprouvette.
- Bien éliminer les bulles d'air.
- Lire le nouveau volume ( $V_2$ ).

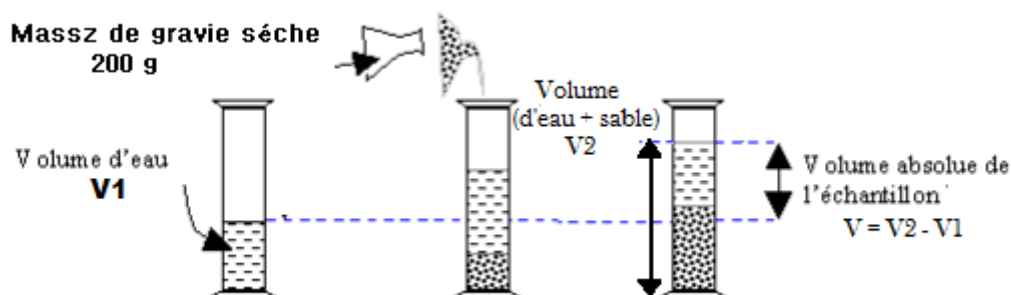


Figure IV.6. Détermination de la masse volumique absolue.

## IV.3.2.1.5. Formulation :

- Il est recommandé de faire 3 essais et de prendre la moyenne.
- Le volume absolu est  $V = V_2 - V_1$  et la masse volumique absolue est :

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

## IV.3.2.1.6. Résultats :

Les résultats de la masse volumique absolue des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau IV.14. Masses volumiques absolues des graviers.

	N d'essai	La masse (g)	Volume <sub>1</sub> (cm <sup>3</sup> )	Volume <sub>2</sub> (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ab}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{ab}$ (moyenne) (g/cm <sup>3</sup> )
Gravie (3/8)	1	300	200	320	2,5	2,61
	2	300	200	310	2,73	
	3	300	200	315	2,60	
Gravie(8/15)	1	300	200	313	2,65	2,63
	2	300	200	314	2,64	
	3	300	200	315	2,60	

**IV.3.2.2.Masses volumiques apparent des graviers: (NF P 18-554 [50])**

C'est la masse de l'unité de volume apparent du corps, c'est –à-dire du volume constitué par la matière du corps et les vides qu'elle contient.

**IV.3.2.2.2.Principe:**

Remplir une mesure de récipient ; et en déterminer la masse.

**IV.3.2.2.3.Matériel :**

- Une mesure de volume récipient vide (V) :
- Pour le gravie (3/5) : le volume de récipient(V)=7000 cm<sup>3</sup> (voir photo IV.12).
- Pour le gravie (8/15) : le volume de récipient(V)=10000 cm<sup>3</sup> (voir photo IV.13).
- Une règle à araser. (voir photo IV.9).
- Une balance de précision : force de 4 à 5 kg. (voir photo IV.3).



**Photo IV.12. Récipient de graviers (3/8) et (8/15).**

**IV.3.2.2.4.Mode opératoire :**

- Déterminer le volume du récipient(V).
- Noter la masse du récipient propre et vide (M1).
- Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement (utiliser les mains comme entonnoir naturel).
- Araser à l'aide de la règle métallique, à laquelle on imprime un mouvement horizontal de va et vient, le récipient étant attaqué le long d'une diagonale horizontale.
- Noter la masse du récipient rempli (M2).

**IV.3.2.2.5.Formulation : [48]**

- Il est recommandé de faire 3 essais et de prendre la moyenne.
- La masse apparent est  $M = M_2 - M_1$  et la masse volumique apparent est :

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (\text{g/cm}^3)$$

**IV.3.2.2.6.Résultats :**

Les résultats de la masse volumique apparente des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.15. Masses volumiques apparent des graviers.**

	N d'essai	La masse <sub>1</sub> (g)	La masse <sub>2</sub> (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{app}$ (moyenne) (g/cm <sup>3</sup> )
Gravie (3/8)	1	2,929	12,554	7000	1,37	1,35
	2	2,929	12,418	7000	1,35	
	3	2,929	12,318	7000	1,34	
Gravie (8/15)	1	3,462	16,225	10000	1,27	1,30
	2	3,462	16,854	10000	1,33	
	3	3,462	16,631	10000	1,31	

**IV.3.2.3. La porosité des graviers : (NF P 18-554 [50])**

La porosité est le rapport du volume vide au volume total.

Elle est définie aussi comme le volume de vide par unité de volume apparent, peut être déterminée par la formule suivante :

**IV.3.2.2.2.Formulation :**

$$p = \frac{V_v}{V} = \left(1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{ab}}\right) * 100 \quad (\%)$$

**IV.3.2.3.3.Résultats :**

Les résultats de la porosité des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.16. La porosité des graviers.**

	$\rho_{ab}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	P(%)
Gravie (3/8)	2,61	1,37	47,51
Gravie (8/15)	2,63	1,38	47,53

**IV.3.2.4. compacité des graviers:**

La compacité d'un matériau est une proportion de son volume réellement occupé par la matière solide qui le constitue, c'est-à-dire le rapport du volume absolu des grains au volume apparent du matériau.

**IV.3.2.4.2.Formulation :**

La compacité donnée la formule :

$$C = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = \frac{\rho_{app}}{\rho_{ab}} * 100 \quad (\%)$$

**IV.3.2.4.3.Résultats :**

Les résultats de la compacité des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.17. La compacité des graviers.**

	$\rho_{ab}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	C(%)
Gravie (3/8)	2,61	1,37	52,49
Gravie (8/15)	2,63	1,38	52,47

**IV.3.2.5. indice des vides des graviers :****IV.3.2.5.1.Formulation :**

Indice du vide donné par la formule :

$$I = \frac{P}{C}$$

**IV.3.2.5.2.Résultats :**

Les résultats de l'indice des vides des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.18. Indice des vides des graviers.**

	P (%)	C (%)	I
Gravie (3/8)	47,51	52,49	0,90
Gravie (8/15)	47,53	52,47	0,90

**IV. 3.2.6. Teneur en eau des graviers: (NF P 18-554 [50])****IV. 3.2.6.1.Formulation :**

La teneur en eau donnée la formule :

$$W = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (\%)$$

Ou :

$M_h$  : Poids du sable humide.

$M_s$  : Poids du sable sec.

**IV.3.2.6.2.Résultats :**

Les résultats de la teneur en eau des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.19. La teneur en eau des gravies.**

	N d'essai	La masse humide (g)	La masse sec (g)	w (%)	w(moyenne) (%)
Gravie (3/8)	1	500	498	0,40	0,53
	2	500	497	0,60	
	3	500	497	0,60	
Gravie (8/15)	1	500	497	0,60	0,46
	2	500	498	0,40	
	3	500	498	0,60	

**IV.3.2.7. Degré d'absorption d'eau des graviers : (NF P 18-554 [50])**

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorption et de retenir l'eau.

**IV.3.2.7.2. Mode opératoire :**

- Peser un échantillon de graviers sec, soit  $M_s = 700\text{g}$  sa masse.
- Immerger l'échantillon testé dans un bac plein d'eau pendant 24 heures à  $20^\circ\text{C}$ .
- Peser l'échantillon de nouveaux ; soit  $M_h$  sa masse.

**IV.3.2.7.3. Formulation :**

Le degré d'absorption d'eau est donné par la formule :

$$\text{Abs} = \left( \frac{M_h - M_s}{M_s} \right) * 100 \quad (\%)$$

**IV.3.2.7.4. Résultats :**

Les résultats de la teneur en eau des matériaux sont présentés dans le tableau suivant:

**Tableau IV.20. La Degré d'absorption d'eau des graviers.**

	N d'essai	$M_h(\text{g})$	$M_s(\text{g})$	Abs(%)	Abs (moyenne) (%)
Gravie (3/8)	1	709,06	700	1,29	1,29
	2	709,77	700	1,39	
	3	708,53	700	1,21	
Gravie (8/15)	1	712	700	1,71	1,66
	2	711	700	1,57	
	3	712	700	1,71	

**IV.3.3. ciment CPJ-CEM II / 42,5: (NA 442[51])**

Le ciment de base utilisé dans notre recherche, est un ciment Portland composé de classe 42,5 provient de la cimenterie de Lafarge de Hammam Dalaa M'sila.

**IV.3.3.1. Description :**

Le ciment portland composé CPJ-CEM II / 42,5 est un produit en broyant le clinker qui se compose essentiellement de silicate de calcium avec le gypse comme ajout constitué de différentes forme se calcium, il est conforme à la norme NA 442.

Il est généralement utilisé lorsqu'il n'y a pas de besoins spéciaux, dans les ouvrages en béton qui ne sont pas exposés à des conditions sévères comme l'attaque des sulfates du sol ou de l'eau.

Il est appliqué dans plusieurs domaines à savoir :

- Le secteur de construction en béton armé pour les bâtiments résidentiels et administratifs
- Le secteur de travaux publics pour les ponts, les revêtements des routes ou les structures ferroviaires.

**IV.3.3.2.Résultats :**

Les caractéristiques du CPJ sont regroupées dans le tableau suivant: [52]

**Tableau IV.21. Caractéristiques du ciment CPJ-CEM II.**

		Unités	Valeur
Masse volumique absolue		g/cm <sup>3</sup>	3,1
Consistance normale		%	26 – 28
La finesse (Blaine)		cm <sup>3</sup> /g	4000 – 4200
Le Chate lier	A froid	mm	00
	A chaud		2
Temps de prise	Début	Heur : min	2 : 30
	Fin		3 : 30
Résistance à La compression	2 jours	MPa	18
	7 jours		32
	28 jours		Plus de 42.5

**IV.4.Les caractéristiques mécanique des graviers (3/8), (8/16) :**

Ce sont des essais importants pour les granulats routiers. En effet, le passage répété de véhicules conduit à émousser, à polir progressivement les granulats et ainsi à diminuer l'adhérence des pneumatiques sur la chaussée.

Ces caractéristiques permettent également d'estimer la qualité des granulats utilisée dans la confection des bétons.

**IV. 4.1.Essai Los Angeles : (NF P18-573 [53]) (voir photo IV.13)**

Comme l'essai précédent, cet essai renseigne sur la dureté des roches se basant sur un coefficient, appelé coefficient Los Angeles  $L_A$ , et sur le principe de l'effritement par abrasion.



**Photo IV.13. Appareil de l'essai Los Angeles.**

#### **IV. 4.1.2.Principe de l'essai:**

L'essai consiste à mesurer la masse ( $M$ ) d'éléments inférieur à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet aux chocs de boulet normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles en 500 rotations.

#### **IV. 4.1.3.Formulation:**

Si  $M$  est la masse du matériau soumis à l'essai et  $m$  la masse des éléments inférieurs à 1.6 mm produits au cours de l'essai, la résistance à la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles ( $L_A$ ) :

$$L_A = \left( \frac{M_1 - M_2}{M_1} \right) * 100 \quad (\%)$$

#### **IV. 4.1.4.Résultats :**

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

**Tableau IV.22. Essai Los Angeles des graviers (3/8), (8/15) .**

	Tamis (mm)	Masse initiale $M_1$ (g)	Masse $M_2$ (g)	Coef de Los A $L_A$ %
Gravier(3/8)	(4-6,3)	5000	3851	22,98
Gravier(8/15)	(6,3-10)	5000	3945	21,1
	(10-16)	5000	3956	20,88

**IV. 4.1.5. Classification :**

Un tableau de classification a été déjà tracé. Il permet de classer les roches en fonction du coefficient Los Angeles.

**Tableau IV.23. Classification des roches en fonction du coefficient  $L_A$ . [54]**

Coefficient $L_A$	Nature de la roche
< 20	Très dure
20 à 25	Dure
25 à 30	Assez dure
30 à 40	Mis dure
40 à 50	Tendre
> 50	Très tendre

On a :

Le gravier (3/8) : c'est un gravier dure ( $L_A = 22,98 \%$ ) .

Le gravier (8/15) : c'est un gravier dure ( $L_A = 20,88 \%$ ) .

**IV.4.2. Micro Deval : (NF P 18-572 [55]) (voire photo IV.14)**

Mesure de la résistance à l'usure d'une fraction granulaire. [56]



**Photo IV.14. Appareil de l'essai Micro Deval.**

**IV.4.2.2. Principe :**

Une fraction  $d/D$  du matériau est soumise à une usure produite par frottements réciproques des grains en présence d'eau et d'une charge de billes dans un cylindre en rotation. [56]

**IV.4.2.3.Mode opératoire :**

- Prise d'essai de 500 g lavée et séchée.
- Mise en place dans un tambour avec 5 kg de billes métalliques calibrées et 2.5 litres d'eau.
- Appliquer une rotation de 12 000 tours au tambour à la vitesse de 100 tours/minute.
- Retirer alors la prise d'essai, pour lavage au-dessus d'un tamis de 1.6 mm.
- Peser le refus à ce tamis après séchage (M, exprimé en g). [57]

**IV.4.2.4.Formulation :**

$$M_{DE} = \frac{M}{500} * 100 \quad (\%)$$

**IV.4.2.5.Résultats :**

Les résultats obtenus sont présentés au tableau suivant :

**Tableau IV.24. Essai Micro Deval des graviers.**

	Masse initiale m (g)	Masse M (g)	Micro Deval M <sub>DE</sub> %
Gravier (3/8)	500	94,6	18,92
Gravier (8/15)	500	90	18

**IV.4.2.6.Classification : (voir tableau 25)**

**Tableau IV.25.Classification de la roche en fonction du coefficient Micro Deval . [58]**

Coefficient L <sub>A</sub>	Nature de la roche
< 15	Très dure
15 à 20	Dure
20 à 25	Assez dure
25 à 30	Mis dure
30 à 45	Tendre
> 45	Très tendre

On à :

Le gravier (3/8) :c'est un gravier dure (M<sub>DE</sub>= 18,92%) / (15<M<sub>DE</sub>< 20).

Le gravier (8/15) :c'est un gravier dure (M<sub>DE</sub>= 18%) / (15<M<sub>DE</sub>< 20).

### IV.5. Les Caractéristiques chimiques des matériaux utilisés :

#### IV.5.1.Sable :

La composition chimique du sable de dune (OUED MAITRE) est établie en mars 2005, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée au tableau suivant :

#### IV.5.1.2.Résultats :

**Tableau IV.26. Analyse chimique du sable de BOUSSAÂDA.**

CONSTITUANTS		
Élément	Symbole	Teneur en (%)
Silice	SiO <sub>2</sub>	86.95
Chaux	CaO	6.33
Oxyde de ferrique	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.90
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.92
Oxyde de magnésium	MgO	0.53
Sulfate	SO <sub>3</sub>	0.44
Pente au fer	P.A.F	2.81

#### Commentaire :

Le sable de BOUSSAÂDA est un sable à haute teneur en silice.

#### IV.5.2.Graviers (3/8) ;(8/15):

La composition chimique du gravier de carrière COSIDER est établie en mars 2004, à la cimenterie de ACC (M'sila). Elle est donnée au tableau suivant : **[59]**

#### IV.5.2.2.Résultats :

**Tableau IV.27 : Analyse chimique de la pierre concassée.**

ÉLÉMENT	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
Teneur (%)	40.65	8.87	40.56	3.25	3.65	0.79	0.65	0.01

#### IV.5.3.Ciment :

L'analyse chimique et minéralogique du CPJ est établie au laboratoire de l'ACC. Les résultats sont regroupés dans les tableaux suivants : **[50]**

#### IV.5.3.2.Résultats :

**Tableau IV.28.Caractéristiques chimiques du CPJ .**

ÉLÉMENT	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
Teneur (%)	20.7	4.75	62.92	3.75	1.90	1.98	0.09

Tableau IV.29:Caractéristiques minéralogique du CPJ.

Éléments	C3S	C2S	C3A	C4AF
	3CaOSiO <sub>2</sub>	2CaOSiO <sub>2</sub>	3CaAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4CaOAl <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Teneur %	59	14	6	10

#### IV.5.4. Eau:

La composition chimique d'eau du laboratoire de département de génie civil est établie en 10/05/05, à laboratoire de département de chimie (M'sila).

##### IV.5.4.2.Résultats :

Elle est donnée par le tableau suivant :

Tableau IV.30.Caractéristiques Chimique D'eau.

La mesure	Teneur en (mg / l )
Le temps de prise d'échantillon	10/10/05 (9.25)
Degré de température	24.7
PH	7.78
Conductibilité	1799
Chlore $Cl^-$	234.3
Sulfate $So_4^-$	351.60
Magnesium $Mg^{2+}$	110.8
Sodium $Na^+$	/
Calcium $Ca^{2+}$	267.2
Sédiment sec	1412
rééligibilité d'oxydation en eau	1024

#### IV.6.Les polystyrènes :

Le polystyrène expansé a des différents classes selon les caractéristiques physiques donc on a essayé d'avoir une idée pour cela on a résumé ces information sur les tableaux ci-dessous :

##### IV.6.1.Caractéristiques physique :

Tableau IV.31. Caractéristiques de polystyrène ( $\alpha$ ,  $\lambda$ ,  $\pi$  et  $M$ ). [60]

Dilatation thermique $\alpha$ (m/m. <sup>0</sup> C)	Conductivité thermique $\lambda$ (w/m. <sup>0</sup> C)	Perméabilité à la vapeur d'eau $\pi$ (g/m.h.mmHg)	Résistance à la diffusion de vapeur $M$ (s d)
0,008	0,042	300,10 <sup>5</sup>	70

Tableau IV.32. Caractéristiques de l polystyrène ( $C$ ,  $\theta$ ,  $\rho$  et  $P$ ). [60]

Chaleur spécifique $C$ (Kal/ <sup>0</sup> CKg)	Température de fusion $\theta$ ( <sup>0</sup> C)	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Pouvoir calorifique $P$ (MJ/kg)
0,36	270	14	38,5

## IV.6.2.Caractéristiques mécaniques :

Tableau IV.33. Caractéristique de polystyrène ( $\sigma_t$ ,  $\sigma_c$ , E et  $\sigma$ ) . [60]

Contrainte de traction $\sigma_t$ (Mpa)	Contrainte de compression $\sigma_c$ (Mpa)	Module d'élasticité longitudinal E(Mpa)	Résistance à la traction $\sigma =$ (Mpa)
28	28	2600	0,2 à 0,3

Tableau IV.34. Caractéristique de polystyrène (E et A) . [60]

Élasticité transversale E(Mpa)		Allongement à la rupture A
8 à 20 (Kg/m <sup>3</sup> )	20 à 40 (Kg/m <sup>3</sup> )	(%)
0,8 à 2	2 à 4	3

## IV.6.3.Caractéristiques acoustique :

Tableau IV.35. Caractéristique de polystyrène (V et  $f_c$ ) .[60]

Vitesse du son V (m/s)	Fréquence critique $f_c$ (Hz)
425	14000

## IV.6.4.Caractéristiques électrochimiques et électriques :

Tableau IV.36. Caractéristique de polystyrène ( $\theta$  et  $\rho$ ) .[60]

Angle contact eau/matériau $\theta$ (°)	Résistivité électrique $\rho$ ( $\Omega.m$ )
93 à 97	$10^{20}$

## IV.6.5.Autre caractéristiques :

Tableau IV.37. Caractéristique de polystyrène ( $\tau$ , HR, U, C, et P) .[60]

Humidité en œuvre $\tau$ (%)	Humidité relative HR(%)	Teneur en eau U(%)	Capillarité C(%)	Perméabilité a l'eau P(m/s)
2	0	0,01	0	0

**IV.6.6. Conductivité thermique et masse volumique :****Tableau IV.38. Conductivité thermique et masse volumique : [60]**

Types de polystyrène	$\lambda$ (w/m. °C)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
Classe <b>I</b>	0,044	11
Classe <b>II</b>	0,042	15
Classe <b>III</b>	0,039	18
Classe <b>IV</b>	0,039	25
Thermo comprimé	0,039	/
Extrudé	0,035 et 0,039	39
Rigide PVC	0,031 et 0,034	38
Rigide polyuréthane	0,029 – 0,030 – 0,033	35

**IV.6.7. Caractéristiques étudiées pratiquement :( La masse volumique apparente)**

Pour déterminer la classe de polystyrène utilisé dans notre étude on réalisé l'essai suivante.

**IV.6.7.1. Mode opératoire :**

- On coupe un échantillon de polystyrène expansé comprimé de dimension (3.8 \*6\*8) m<sup>3</sup>
- On pèse cet échantillon

**IV.6.7.2. Formulation :**

La masse volumique apparente peut être obtenue par la formule suivante :

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{Kg/m}^3)$$

**IV.6.7.3. Résultats :****Tableau IV.39. Masses volumiques apparent de polystyrène.**

	N d'essai	La masse (g)	Volume (cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{app}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_{app}$ (moyenne) (g/cm <sup>3</sup> )
polystyrène	1	18,24	1000	0,01824	0,01828
	2	18,21	1000	0,01821	
	3	18,39	1000	0,01839	

**IV.7.Conclusion :**

La durabilité du béton dépend de sa résistance, qui est, à son tour, liée à la qualité générale du béton et à la qualité de chacun de ses constituants. Enfin, pour qu'un granulat puisse être un bon constituant du béton, il faut donc :

- Qu'il soit convenable du point de vue pétrographique,
- Qu'il joue bien son rôle de « produit de remplissage » : pour cela, ses caractéristiques géométriques et physico – mécaniques doivent être appropriées à la destination du béton, ce qui implique des spécifications bien adaptées ; il serait peu économique d'exiger systématiquement « le meilleur banc de la meilleure carrière ».

# *CHAPITRE V*

*Techniques expérimentales*

**CHAPITRE V : Techniques expérimentales****V.1. Introduction:**

Dans ce chapitre, nous allons préparer les quantités requises de ciment, les granulats et d'eau pour préparer 27 échantillons de béton ainsi que les pourcentages de polystyrènes dans chaque éprouvettes, est d'étudier la propagation des ondes ultrasonores à l'intérieur des échantillons et l'effet des pourcentages des polystyrènes sur l'atténuation des ondes ultrasonores dans L'éprouvette.

**V.2. Définition du béton :**

Les bétons sont conçus suivant une formulation, donnée sous forme de quantité massique de chaque composant afin d'obtenir un volume de  $1\text{m}^3$  de béton. Il existe différentes méthodes de formulations, qui visent à optimiser l'empilement des différentes particules (grains de ciment, sable, gravillons) afin de minimiser les espaces vides [Dreux and fiesta 1998 ; larrard2000] le choix de la formulation permet d'obtenir des propriétés mécaniques ou de mise œuvre recherchées.

Le mélange des différents constituants du béton lors de sa fabrication s'appelle une « gâchée »

**V.3. Détermination de la composition du béton :**

L'étude de la composition du béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats, ainsi que le dosage en ciment et en eau, afin de réaliser un béton donné. Elle a pou but d'établir les dépenses en matériaux pour un mètre cube de béton frais.

La composition d'un béton frais est défini par un rapport des masses entres les quantités de ciment, le sable et de pierres concassées avec l'indication du rapport Eau / ciment. [61]

Plusieurs méthodes de composition sont proposées par des spécialistes de renom, tels que Bolomey, Abrams, Faury, Dreux et Gorisse, ainsi que des Russes comme Bétaïev et Scramtaïev.

Ces méthodes, soit à granularité « continue », qui permet d'obtenir des béton plus plastiques et de bonne ouvrabilité, soit par contre à granularité discontinue, qui conduit en général à des résistances en compression un peu supérieures, mais parfois au détriment de l'ouvrabilité  $\left[\frac{G}{S} \text{ élevé}\right]$ . [62]

En ce qui nous concerne, le mélange optimal nous irons la chercher en utilisant la méthode de Dreux – Gorisse.

Notre choix a été dicté par le fait que la méthode de Dreux – Gorisse est permet de définir d'une façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton étudié.

#### V.4. Formulation des différentes compositions testées : (La méthode de Dreux-Gorisse)

##### ➤ Béton + polystyrène

##### Données de bases :

- Affaissement au cône  $A_f = 7\text{cm}$
- le rapport  $E/C = 0.5$

##### Calculer le dosage en ciment :

Évaluation le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport  $C/E$  et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône  $A_f$ ) (voir figure V.1)

- Affaissement au cône  $A_f = 7\text{cm}$
- le rapport  $E/C = 0.5 \rightarrow C/E = 2$

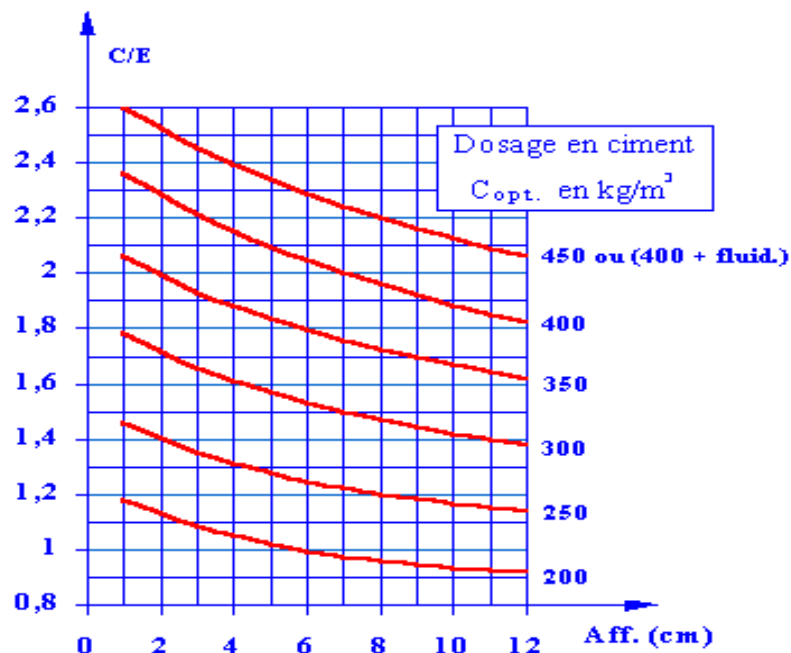


Figure V.1. Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport  $C/E$  et de l'ouvrabilité désirée (affaissement au cône).  
 → le dosage en ciment :  $C = 400 \text{ Kg/m}^3$

##### Calculer le dosage en eau :

- le dosage en ciment :  $C = 400 \text{ Kg/m}^3$
  - le rapport  $E/C = 0.5$
- le dosage en eau :  $E = 400 \times 0.5 = 200 \text{ Kg/m}^3$

**Correction du dosage en eau en fonction de  $D_{\max}$  :**

Les données précédents sont plus particulièrement applicables aux bétons dont la dimension maximale des granulats est d'environ  $D=16\text{mm}$  (dimension la plus courante). Si l'on a  $D < 25\text{mm}$ , la surface spécifique des granulats augmente et à plasticité qui valent, il faudra légèrement majorer le dosage en eau, et vice-versa.

La correction sur le dosage en eau correspond à  $D=16\text{mm}$ , peut être approximativement évaluée d'après les valeurs du tableau V.1. en fonction de  $D$ .

**Tableau V.1. Correction en pourcentage sur le dosage en eau en fonction de la dimension maximale des granulats. [63]**

Dimension maximale des granulats $D$ en mm	5	10	<u>16</u>	25	40	63	100
Correction du dosage en eau (%)	+15	+9	<u>+4</u>	<u>0</u>	-4	-8	-12

$$200\text{Kg/m}^3 \longrightarrow 100\%$$

$$X \longrightarrow 6\%$$

$$E = 200 + X$$

$$\rightarrow \text{la correction d'eau : } E = 200 + 8 = 208 \text{ Kg/m}^3$$

**Caractéristiques techniques du sable :**

Masse volumique, Masse spécifique et module de finesse qui est égale à 2,53.

**Caractéristiques techniques des granulats :**

- Dimension maximale des granulats ( $D_{\max} = 16 \text{ mm}$ ).
- Les granulats concassés.
- Masse volumique apparente et masse spécifique.

Sur le graphe d'analyse granulométrique (Figure V.2.), on trace la courbe granulaire de référence OAB.

\_ Point B à l'ordonnée 100% correspond à la dimension  $D$  du plus gros granulat.

$$\text{Point B} \begin{cases} X = 16\text{mm.} \\ Y = 100\% \end{cases}$$

\_ Point de brisure A à pour coordonnées :

- En l'abscisse  $X_A$  :

$$D \leq 25,$$

$$X = D / 2$$

$$\rightarrow X = 16/2 = 8\text{mm}$$

- En ordonnée :

$$Y = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

Les valeurs de  $K$  et  $K_s$  et  $K_p$  sont données par :

**K** : optimisation de la compacité en fonction du type de vibration, de la forme des granulats, et du dosage en ciment. (Voir Tableau V.2.)

Tableau V.2. Valeurs de K . [63]

Vibration		Faible		normale		Puissante	
Forme des granulats		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en ciment	400+fluides	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	<u>-2</u>	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

→ **K** = -2 , (pour les granulats roulés, Dosage de ciment C = 400 kg/m<sup>3</sup> et une vibration normale).

**K<sub>S</sub>** : ajustement de la granularité du sable pour  $2 \leq M_f \leq 3$  ; ( $M_f$  : module de finesse du sable)

$$K_S = 6 M_f - 15 \quad (M_f = 2,60)$$

→ **K<sub>S</sub>** = 0,6

**K<sub>p</sub>** : ajustement du dosage en sable pour faciliter le transfert par les pompes à béton.

→ **K<sub>p</sub>** = 0, (pour le béton non pompable).

$$\text{Point A : } \begin{cases} X = \frac{16}{2} = 8 \text{ mm.} \\ Y = 44,6\% \end{cases}$$

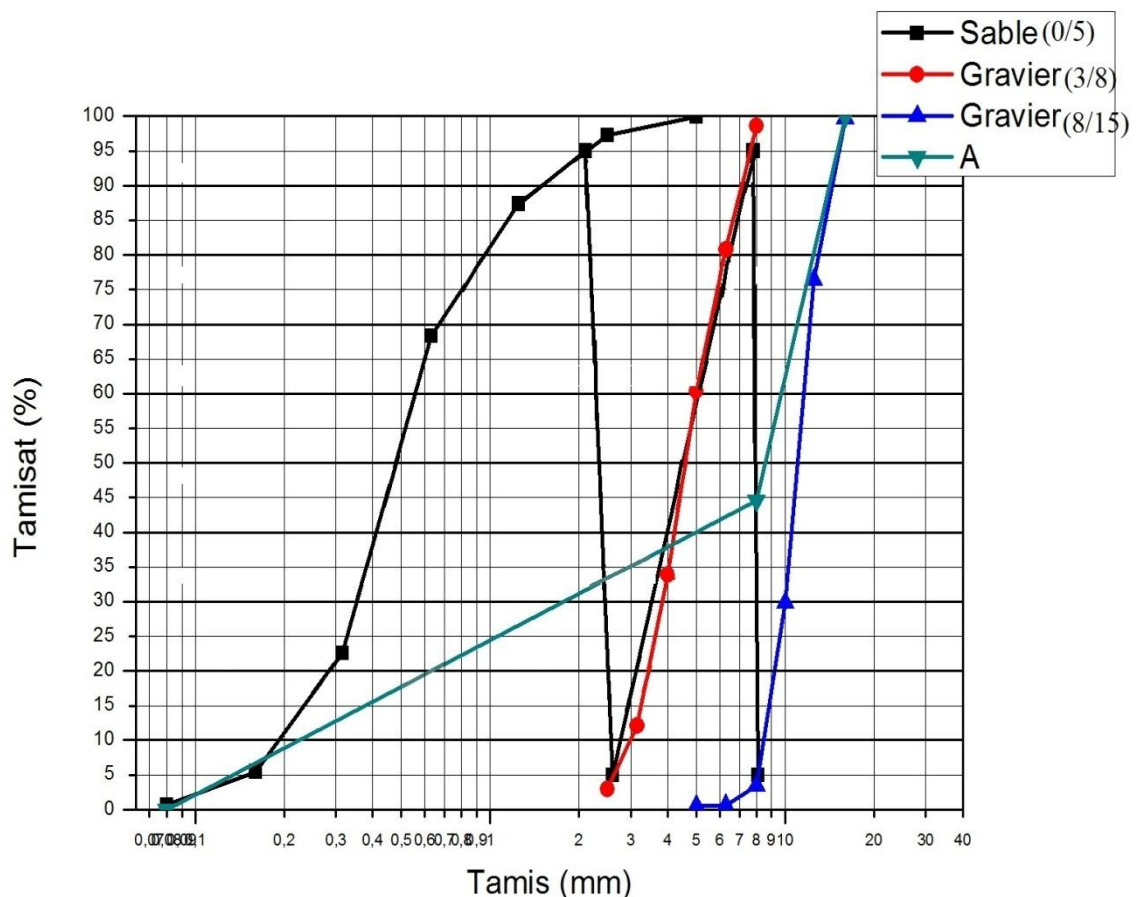


Figure V.2. La courbe granulaire.

**Déterminer les pourcentages de granulats :**

La courbe granulaire de référence OAB doit être tracée sur le même graphe (voir figure V.1.) que les courbes granulométriques des granulats composants.

On trace alors les lignes de partage entre chacun en joignant le point à 95% de la courbe granulaire du premier, au point à 5% de la courbe du granulats suivant, et ainsi de suite.

On lira alors sur la courbe de référence au point de croisement avec la ou les droites de partage le pourcentage en volume absolu de sable.

Les résultats obtenus sont :

Sable  $\longrightarrow$  34,5%

Gravies (3/8)  $\longrightarrow$  09,5%

Gravies (8/15)  $\longrightarrow$  56%

**Coefficient de compacité  $\gamma$  : ( voir tableau V. 3.)**

**Tableau V.3. Valeurs du coefficient de compacité . [63]**

Consistance	Compactage (serrage)	Coefficient de compacité $\gamma$						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0.750	0.780	0.795	0.805	0.819	0.815	0.820
	Vibration faible	0.755	0.785	0.800	0.810	0.829	0.820	0.825
	Vibration normale	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
Plastique	Piquage	0.760	0.790	0.805	0.815	0.820	0.825	0.830
	Vibration faible	0.765	0.795	0.810	0.820	0.825	0.830	0.835
	Vibration normale	0.770	0.800	0.815	0.825	0.830	0.835	0.840
	Vibration puissante	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0.845
Ferme	Vibration faible	0.775	0.805	0.820	0.830	0.835	0.840	0,845
	Vibration normale	0.780	0.810	0.825	0.835	0.840	0.845	0,850
	Vibration puissante	0.785	0.815	0.830	0.840	0.845	0.850	0,855

**Note:** Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés si non il conviendra d'apporter les corrections suivantes:

- sable roulé et gravier concassé = - **0.01**;
- sable et gravier = - **0.03**
- pour les granulats légers, on il y a lieu de diminuer 0.03 des valeurs de  $\gamma$  qui correspondent à des granulats ordinaires.

$\left\{ \begin{array}{l} D = 16 \text{ mm} \\ \text{Béton plastique} \\ \text{Vibration normale} \end{array} \right. \longrightarrow \gamma = \mathbf{0,820}$

Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

- sable roulé et gravier concassé = - 0.01 ;

Donc  $\gamma = 0.820 - 0.01$

$\gamma = \mathbf{0.810}$

**Détermination de volume granulats :**

$$V_C = \frac{C}{3,10}$$

$$V_C = \frac{400}{3,10} = 129,032 \text{ } \ell / \text{m}^3$$

$$V_g = V_T - V_C$$

$$V_g = 1000 \gamma - V_C$$

$$V_g = 1000 (0,810) - 129,032 = 680,967 \text{ } \ell / \text{m}^3$$

$$V_g = 680,967 \text{ } \ell / \text{m}^3$$

**Détermination du volume absolu de chaque granulat:**

$$\text{Volume absolu du sable} = 680,967 * 0.345 = 234,933 \text{ } \ell$$

$$\text{Volume absolu de gravier (3/8)} = 680,967 * 0.095 = 64,692 \text{ } \ell$$

$$\text{Volume absolu de gravier (8/16)} = 680,967 * 0.56 = 381,341 \text{ } \ell$$

**Les masses spécifiques sont :**

$$\text{Sable} = 2.53 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Gravier (3/8)} = 2.61 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Gravier (8/16)} = 2.63 \text{ g/cm}^3$$

**Les dosages en matériaux secs seront donc en kg/m3 :**

$$\text{Ciment} = 400 \text{ Kg/m}^3.$$

$$\text{Sable} = 2.53 \times 234,933 = 594,380 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Gravier (3/8)} = 2.61 \times 64,692 = 168,846 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Gravier (8/16)} = 2.63 \times 381,341 = 1002,927 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Eau} = 208 \text{ Kg/m}^3$$

**La densité théorique du béton frais = 2374,153 kg/m3****Volume total: 03 éprouvettes cubiques (15\*15\*15) cm<sup>3</sup>**

$$V_T = 3 * (15 * 15 * 15) = 10125 \text{ cm}^3$$

$$V_T = 1,25 * 10125 = 12656,2500 \text{ cm}^3$$

$$V_T = 12656,2500 \text{ cm}^3$$

**Volume de polystyrène :**

$$\text{Volume de polystyrène} = \text{Volume total} * (\%) \text{ de polystyrène}$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (0\%)}} = 12656,25 * 0 = 0 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (5\%)}} = 12656,25 * 0,05 = 632,8125 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (15\%)}} = 12656,25 * 0,15 = 1898,4375 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (25\%)}} = 12656,25 * 0,25 = 3164,0625 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (35\%)}} = 12656,25 * 0,35 = 4429,6875 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (45\%)}} = 12656,25 * 0,45 = 5695,3125 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (50\%)}} = 12656,25 * 0,50 = 6328,1250 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (55\%)}} = 12656,25 * 0,55 = 6960,9375 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{polystyrène (3 éprouvettes) (60\%)}} = 12656,25 * 0,60 = 7593,7500 \text{ cm}^3$$

### Volume de béton:

Volume de béton = Volume total - Volume de polystyrène

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (0\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 0 = 12656,2500 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (5\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 632,8125 = 12023,4375 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (15\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 1898,4375 = 10757,8125 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (25\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 3164,0625 = 9492,1875 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (35\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 4429,6875 = 8226,5625 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (45\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 5695,3125 = 6960,9375 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (50\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 6328,125 = 6328,1250 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (55\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 6960,9375 = 5695,3125 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{béton (3 éprouvettes) (60\% de polystyrène)}} = 12656,25 - 7593,7500 = 5062,5000 \text{ cm}^3$$

### Les dosages en secs seront donc en Kg dans un volume total :

Ciment = volume de béton \* dosage de ciment

Sable = volume de béton \* dosage de sable

Gravier (3/8) = volume de béton \* dosage de gravier (3/8)

Gravier (8/15) = volume de béton \* dosage de gravier (8/16)

Eau = volume de béton \* dosage de l'eau

Polystyrène = volume de postèrent \* masse apparent de polystyrène

**La masse volumique apparente du polystyrène est :  $0,01828 \text{ g/cm}^3$**

En fin, la composition précise pour chaque béton est donnée dans le tableau V.4.

**Tableau V.4. Les résultats de la formulation du différent béton (03 éprouvettes cubique).**

Les matériaux polystyrène(%)	Ciment (Kg)	Sable (Kg)	Gravier (3/8) (Kg)	Gravier (8/16) (Kg)	Eau (Kg)	Polystyrène (g)
<b>Témoin</b>	5,06	7,52	2,14	12,69	2,63	0,00
<b>5%</b>	4,81	7,15	2,03	12,06	2,50	11,57
<b>15%</b>	4,30	6,39	1,82	10,79	2,24	34,70
<b>25%</b>	3,80	5,64	1,60	9,52	1,97	57,84
<b>35%</b>	3,29	4,89	1,39	8,25	1,71	80,97
<b>45%</b>	2,78	4,14	1,18	6,98	1,45	104,11
<b>50%</b>	2,53	3,76	1,07	6,35	1,32	115,68
<b>55%</b>	2,28	3,39	0,96	5,71	1,18	127,25
<b>60%</b>	2,03	3,01	0,85	5,08	1,05	138,81

## V.5. Confection et cure des éprouvettes :

### V.5. 1 Moules pour éprouvettes :

Conformément à la norme européenne NF EN12390 -1 [64], pour les besoins de notre étude et selon la nature de l'essai à réaliser, on a utilisé les moules suivants (voir la photo IV.1.) pour la confection des éprouvettes :

- Moule cubique 15\*15\*15 cm.



**Photo V.1. Moule cubique 15\*15\*15 cm.**

### V.5. 2. Confection des éprouvettes :

La préparation des mélanges a été effectuée suivant un dosage pondéral des granulats et conformément à la norme française NF P18 - 404[65] qui consiste à :

- Introduire, en premier lieu, dans un malaxeur à béton (voir la photo V.2.), les constituants dans l'ordre suivant : gravillons, liant, sable,
- Malaxer à sec les éléments de l'ordre de 1min,
- Ajouter l'eau de gâchage et poursuivre le malaxage pendant 2min.

- La gâchée exécutée pour l'essai d'étude en question doit être telle qu'elle permet d'obtenir un volume de béton compacté excédant celui des éprouvettes à remplir d'au moins 25%.
- On mélange et on homogénéise la gâchée exécutée et on en prélève la quantité voulue pour le remplissage des moules en trois couches pour les moules cubiques. Le serrage du béton doit être effectué immédiatement après le remplissage, par table vibrante (voir la photo V.3.), pour chaque couche du béton introduite.



**Photo V.2. Un malaxeur à béton.**



**Photo V.3. Table vibrante.**

### **V.5. 3. Conservation des éprouvettes :**

Après la mise en place du béton, les éprouvettes sont maintenues pendant 24 heures, dans leurs moules à l'intérieur du laboratoire. Pour éviter toute évaporation de l'eau, la face supérieure du moule est recouverte d'un film en plastique, durant la période de conservation. Après démoulage (voir la photo V.4), les éprouvettes sont entreposées dans de l'eau s'effectue trois jours, à une température de  $20 \text{ à } 24 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (voir la photo V.5), et puis à l'air jusqu'au moment de l'essai (voir la photo V.6).



**Photo V.4. Démoulage des éprouvettes.**



**Photo V.5. Maturation des éprouvettes dans le bac thermostat.**



**Photo V.6. Conservation à l'air.**

## **V.6. Essais effectués sur les bétons :**

On appelle béton la pierre artificielle obtenue grâce au durcissement d'un béton mélange de liant, d'eau et d'agréats (sable et pierre concassée ou gravier) choisi de façon rationnelle.

L'ensemble de ces matériaux avant durcissement s'appelle mélange du béton

Pour contrôler la qualité du béton il faut le contrôler à ses deux états, frais et durci. [66]

### **V.6. 1. Essai du béton à l'état frais :**

#### **V.6. 1.1. Définition :**

Le Béton est matériau de construction formé par un mélange de ciment, de granulats et d'eau. Ce mélange, qui est mis en place sur le chantier ou en usine à l'état plastique, peut adopter des formes très diverses parce qu'il est modulable, il durcit progressivement pour former finalement un monolithe. Selon sa formulation, sa mise en œuvre et ses traitements de surface, ses performances et son aspect peuvent considérablement varier. [67]

#### **V.6.1.2. Essai d'affaissement au Cône d'Abrams "slump-test" : (NF P 18-451)**

Cet essai, appelé aussi essai au cône d'Abrams est décrit dans la norme NF EN 12350-2. Il est facile à réaliser et couramment utilisé. Il caractérise la consistance du béton et son aptitude à se déformer sous son poids propre. Il n'est applicable que pour des bétons dont la dimension maximale des granulats ne dépassent pas 40 mm. Il n'est pas utilisable pour des bétons très secs (consistance terre humide) ou trop fluides ; la plage recommandée pour réaliser cet essai se situe entre S2 et S4 (affaissement compris entre 50 et 210 mm). [67]

##### **V.6.1.2.1. Principe de l'essai :**

Il s'agit de mouler manuellement un tronc de cône de dimensions normalisées et de mesurer, après démoulage, son affaissement sous l'effet de son propre poids. Plus cet affaissement est grand, plus le béton est réputé fluide. [67]

**V.6.1.2.2.Équipement nécessaire : (voir figure V.3)**

L'équipement se compose de :

- un moule tronconique métallique sans fond de  $300 \pm 2$  mm de haut,  $200 \pm 2$  mm de diamètre en sa partie inférieure et de  $100 \pm 2$  mm en sa partie supérieure (volume 5,5 l) ;
- une plaque d'appui rigide et plate ;
- une tige de piquage de  $16 \pm 1$  mm de diamètre et de  $600 \pm 5$  mm de longueur avec des extrémités hémisphériques ;
- un portique de mesure avec une règle graduée de 0 à 300 mm ;
- un entonnoir (facultatif). [67]

**V.6.1.2.3.Mode opératoire : (voir figure V.3)**

- La plaque d'appui et le moule sont légèrement humidifiés, et le moule est fixe contre la plaque d'appui.
- Le remplissage du béton s'effectue en trois couches approximativement d'égales hauteurs. Pour chaque couche,
- le béton est piqué à 25 reprises, les piqures étant réparties uniformément sur la section de la couche supérieure avec la tige de piquage.
- La tige ne doit pénétrer que très légèrement dans la couche sous-jacente à la couche faisant l'objet du piquage.
- L'arasement du béton en excès de la dernière couche se fait à l'aide de la tige de piquage.
- Le moule est ensuite retiré en 5 à 10 secondes par une remontée verticale et régulière.
- Immédiatement après avoir retiré le moule, l'affaissement est mesuré par différence entre la hauteur du moule et le point le plus haut du béton n'affaisse.
- Lorsque le béton cisaille, l'essai doit être refait. [67]

**V.6.1.2.4.Les classes de l'affaissement mesurent:**

La norme NF EN 206-1 définit cinq classes de consistance.

Ces classes sont définies en fonction de l'affaissement mesuré : (voir tableau V.5.)

**Tableau V.5. Les normes des classes de l'affaissement mesuré. [67]**

Plasticité	Serrage	Affaissement A en cm	Nombre de chocs test
Béton très ferme	Vibration puissante	0 à 2	> 60
Béton ferme	Bonne vibration	3 à 5	30 à 50
Béton plastique	Vibration courante	6 à 9	15 à 25
Béton mou	Piquage	10 à 13	10 à 15
Béton liquide	Léger piquage	$\geq 14$	< 10

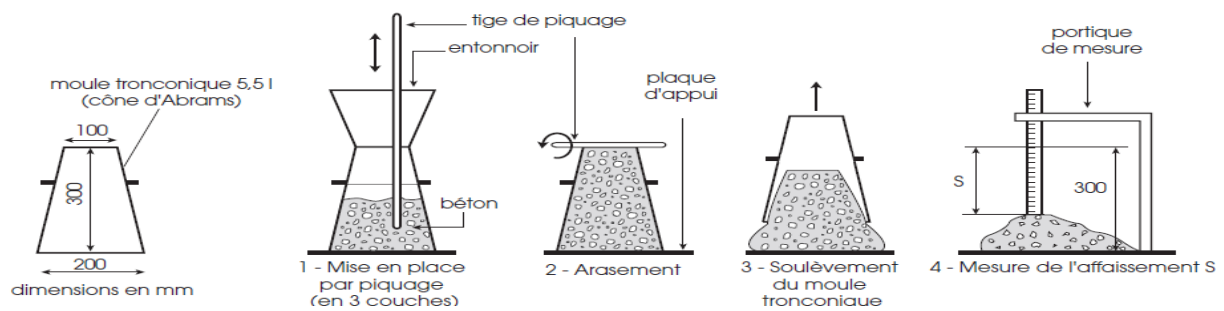


Figure V.3.Essai d'affaissement. [67]

### V.6.1.3. Masse volumique :

La masse volumique du béton frais a été déterminée, pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN12350 – 6 [68].

Elle a été déterminée lors des essais d'étude et corrections de la formule des mélanges par la mise en place du béton frais dans un récipient rigide et étanche à l'eau de volume (V) et de masse ( $m_1$ ), puis pesé l'ensemble, soit la masse ( $m_2$ ).

La masse volumique du béton frais, arrondie aux 10 Kg /m<sup>3</sup> les plus proches, est donnée donc par la formule suivante :

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (\text{Kg/m}_3)$$

### V.6.2. Essai du béton à l'état durci:

#### V.6.2.1. Masse volumique :

Selon la norme européenne NF EN 206 -1 [69], un béton de masse volumique normale, La masse volumique du béton durci a été déterminée, pour les différents bétons confectionnés, conformément à la norme européenne NF EN12390 - 7 [70].

Elle a été déterminée, à l'âge de 28 jours, sur une éprouvette cubiques (15\*15\*15) cm<sup>3</sup> de masse (m) constante après séchage à l'étuve et de volume réel (V).

La masse volumique du béton durci mesurée en moyenne des trois éprouvettes est donnée par la formule suivante :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Kg/m}_3)$$

**V.6.2.2. Essai non destructif du béton:****V.6.2.2.1.Définition :**

Les méthodes normalisées utilisées pour évaluer la qualité du béton dans les bâtiments ou les ouvrages ne prennent en compte que des essais destructifs sur des éprouvettes coulées au même moment. Les principaux désavantages de ces méthodes sont les suivants :

Les résultats ne sont pas obtenus immédiatement, le béton des éprouvettes peut être différent de celui de l'ouvrage car la cure ou le serrage peuvent être différents, les résistances des éprouvettes dépendent également de leurs dimensions et de leurs formes.

Plusieurs méthodes non destructives d'évaluation ont été mises au point. Ces méthodes sont basées sur le fait que certaines propriétés physique du béton peuvent être reliées à la résistance et peuvent être mesurées par des méthodes non destructives. Ces propriétés physiques du béton : vitesse des ultra-sons et la résistance à la compression. [71]

**V.6.2.2.2.Essai d'auscultation sonique : NFP 18-418[72]****V.6.2.2.2.1.Définition**

L'essai d'auscultation dynamique, par vitesse du son, consiste à mesurer le temps de propagation d'ondes sonique dans une éprouvette de béton à l'aide d'un appareil à ultrasons (voir photo V.7.). L'essai a été effectué conformément à la norme française P18 – 418.

**V.6.2.2.2.2.Principe :**

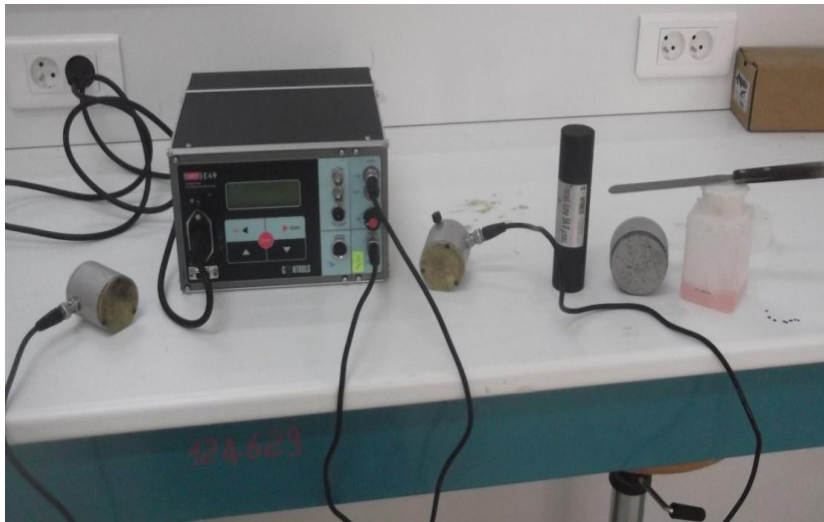
Le principe de l'essai consiste à mesurer la vitesse du son à l'intérieur du béton, cette vitesse est d'autant plus élevé que le béton a un module d'élasticité.

**V.6.2.2.2.3.Équipements utilisés :(voir photo V.6.)**

L'ensemble électrique de l'auscultation permette de mesure le temps de passage des ondes ultrasoniques longitudinales à travers le béton, ce temps indiqué par un affichage digité.

L'appareil d'auscultation dynamique se compose de :

- L'instrumentation électronique logée dans un coffret métallique caractérisé par un appareil présentant sur la face (face utile) un affichage digital, ou on peut lire le temps de propagation des ondes mesurés en ( $\mu s$ ).
- Deux ondes : un émetteur ; et l'autre un récepteur de fréquence.
- Deux câbles pour le branchement des sondes.
- Une éprouvette cubique pour l'étalonnage.
- Un alimentaire en charge (batterie).



**Photo V.7. L'appareil d'auscultation dynamique.**

#### **V.6.2.2.4.Mode opératoire :**

- On branche les deux sondes aux bornes de l'appareil à l'aide de câble.
- On fait l'étalonnage de l'appareil à une valeur de  $58 \mu s$  on enduit les deux faces de l'éprouvette étalon de ((vaseline)).
- On frictionne sur ces deux faces les deux sondes pour éliminer les bulles d'aire que se forment entre la face d'éprouvette.
- On vérifie que la valeur indique sur l'affichage digitale est la même que cette imprimée sur l'éprouvette étalon, connaissent la distance (d) par cour par les ondes.
- On en déduit la vitesse égale à  $(d / t)$  exprimée le plut souvent en (m/s).

#### **V.6.2.2.5.Type de mesures :(mesure en transparence direct) :**

Utilisée dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres.

Le capteur est placé face à l'émetteur, ce que fait que la distance entre les centres des sondes (ou bien la distance parcourue par les sondes) est égale à l'épaisseur de l'élément ausculté.

C'est le type de mesure le plus utilisé et qui fournit plus de précision du temps de propagation des ondes.

#### **V.6.2.2.6.Prescription générale d'essai :**

- Avant chaque emploi, il faut contrôler le calibrage.
- Le temps de passage des ultrasons travers l'éprouvette étalon  $58 \mu s$ .
- Évitez les zones de mauvaise surface.
- Évitez les zones au il a présence d'autre matériaux (céramique).
- Avant faire l'essai marquer les points de mesures sur la surface sur de l'élément.
- Enduire la surface de l'élément avec la vaseline sur les points de mesure.

**V.6.2.2.2.7. La formule :**

La vitesse de propagation du son est calculée par la formule suivante :

$$V = \frac{d}{t}$$

Ou :

$d$  = distance entre faces de l'éprouvette mesurée (m).

$t$  = temps de propagation d'ondes (s).

Si les incertitudes sur les dimensions de l'éprouvette est de l'ordre de  $\Delta d = \pm 0.16\text{mm}$ .

Et la précision de l'ultrason est de l'ordre de  $0.1\mu\text{s}$ , il en découle les incertitudes sur la vitesse :  $\Delta V/V = \Delta d/d - \Delta t/t = 0.16/100 + 0.1/30 = 0.005$  soit 0.5%

Comme une certaine corrélation existe entre la vitesse du son et la résistance, on peut apprécier, des étalonnages préalables, la valeur de résistance de béton.

**V.6.2.3. Essai destructif du béton:****V.6.2.3.1. Essai résistance à la compression : NE EN 12390-3[73]****V.6.2.3.1.1. Définition :**

L'essai de compression est un essai simple, représentatif, reproductible, c'est pourquoi on utilise souvent ses résultats pour caractériser un béton.

La norme AFNOR impose surfaçage (ou polissage) pour chaque éprouvette. Celle-ci est destinée à obtenir des éprouvettes cylindriques ayant leurs faces de chargement planes, orthogonales aux génératrices et frettées dans les mêmes conditions par les plateaux de la presse. (Voir photo V.9.)

**V.6.2.3.1.2. But de l'essai :**

Le but est de déterminer la résistance à la compression du béton. L'essai se fait sur une éprouvette cubique de dimensions normalisées, éprouvette cubique  $(15 \times 15 \times 15)\text{ cm}^3$ .

**V.6.2.3.1.3. Principe de l'essai :**

Après démoulage passade de 24 heures. Généralement, la résistance est déterminée à 7 jours et 28 jours.

**V.6.2.3.1.4. Conduite de l'essai :**

Ce temps écoulé, on retire le moule et on fait passer l'éprouvette à la presse permet la lecture de la force qui s'exerce sur les facettes latérales du cubique de béton.

Éprouvette sera placée entre les deux mâchoires de la machine et on élèvera une seule lecture.

Celle de la force correspondant à la rupture de l'échantillon, soit  $f_c$  cette lecture.

**V.6.2.3.1.5. La formule :**

La résistance sera :  $R_c = \frac{f_c}{S}$  (MPa).

Ou :

S : section de l'éprouvette (m<sup>2</sup>).

Fc : force au moment de la rupture. (KN)



**Photo V.8. Presse hydraulique de compression.**

**V.7. Conclusion :**

Ce chapitre a permis de présenter les facteurs qui sont à prendre en compte dans l'étude de la composition d'un béton. Ces facteurs sont nombreux et on peut citer la méthode de formulation, les propriétés à l'état frais; mode de conservation ainsi que les propriétés à l'état durci soit par l'ultrason, scléromètre ou bien l'écrasement ce qui va être étudié en détaille dans le chapitre suivant.

# *CHAPITRE VI*

## *PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS*

## **CHAPITRE VI : PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS**

### **VI.1.Introduction :**

Ce chapitre est consacré à l'analyse des résultats obtenus lors de notre étude.

Les résultats sont présentés sous forme de tableaux et de graphes.

### **VI.2.Les résultats des poids avec le pourcentage du polystyrène des échantillons:**

Le résultat du poids obtenu en laboratoire est regroupé dans le tableau et représenté dans le graphe ci-dessous :

$$Mm \text{ (g/cm}^3\text{)} = \sum \frac{Mi}{n}$$

Avec :

Mm : la masse volumique moyenne de chaque série en (g /cm<sup>3</sup>).

Mi : la masse volumique de chaque échantillon de même volume et même caractéristique en (g /cm<sup>3</sup>).

n: nombre des échantillons.

Tableau VI.1.Poids des éprouvettes après 28 jours.

Conservation	pourcentage de polystyrène (%)	N° de éprouvette	Masse volumique d'éprouvette $M_i$ (g/cm <sup>3</sup> )	Moyenne de masse volumique de série $M_m$ (g/cm <sup>3</sup> )
28 jours à l'air	Témoin	01	2,3621	2,3609
		02	2,3636	
		03	2,3570	
07 jours à l'eau	Témoin	01	2,4050	2,4045
		02	2,4080	
		03	2,4006	
	5%	01	2,3781	2,3611
		02	2,3455	
		03	2,3597	
	15%	01	2,2471	2,2520
		02	2,2462	
		03	2,2625	
	25%	01	2,0359	2,0334
		02	2,0433	
		03	2,0210	
	35%	01	1,8169	1,8050
		02	1,8145	
		03	1,7837	
	45%	01	1,5490	1,5450
		02	1,5313	
		03	1,5547	
	50%	01	1,4886	1,4442
		02	1,3849	
		03	1,4593	
	55%	01	1,3144	1,3298
		02	1,3268	
		03	1,3481	
	60%	01	1,1108	1,1570
		02	1,1899	
		03	1,1704	

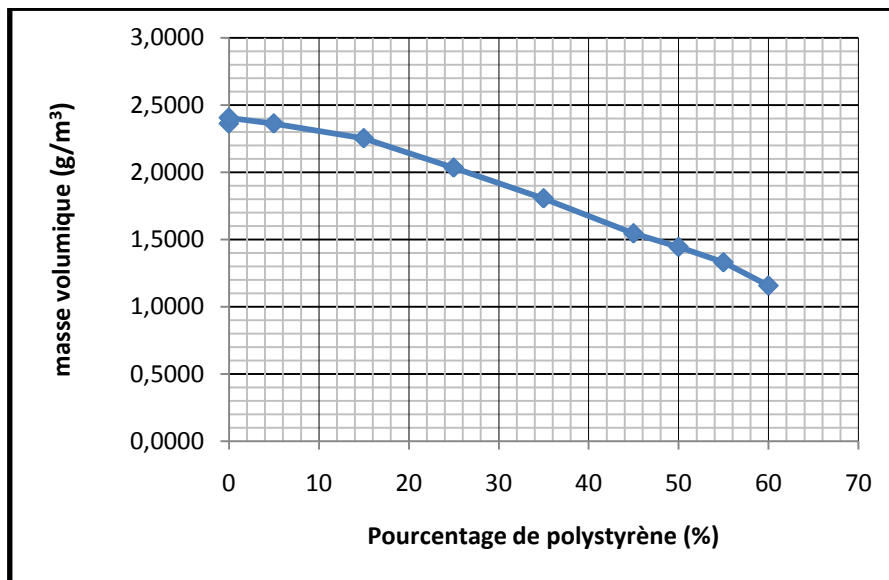


Figure VI.1. La masse volumique des éprouvettes en fonction de pourcentage de polystyrène.

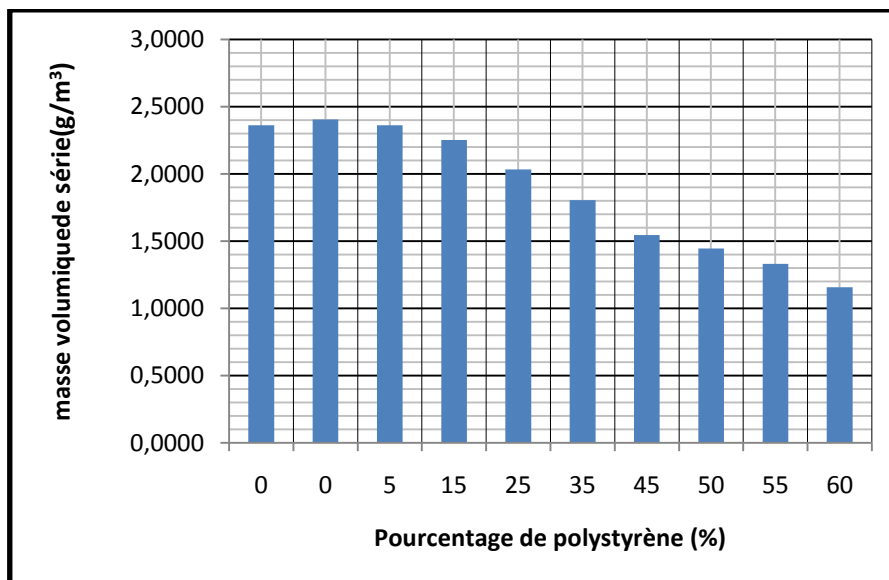


Figure VI.2. La masse volumique des éprouvettes en fonction de pourcentage de polystyrène.

**Commentaire :**

Les figures (VI.1 - VI.2) représentent la relation entre la masse volumique des éprouvettes en fonction du pourcentage de polystyrène.

On constate que la masse volumique des séries diminue inversement proportionnelle avec le pourcentage de polystyrène c'est tout à fait logique, car la densité du polystyrène est minime/

**VI.3.Les essais non destructifs :****VI.3.1.Essais ultrasoniques :**

La propagation ultrasonique dans un matériau est régie par la loi:  $V=L/T$   
Avec :

V : la vitesse de propagation du son (m/s).

L : largeur de l'éprouvette (m).

T : le temps de propagation du son (s).

**Tableau VI.2.les valeurs de temps et la vitesse de propagation de son.**

Age de béton	pourcentage de polystyrène (%)	N° de éprouvette	Distance entre émetteur- récepteur (m)	Temps 1 de propagation ( $\mu$ s)	Temps 2 de propagation ( $\mu$ s)	Temps 3 de propagation ( $\mu$ s)	Temps de propagation ( $\mu$ s)	Temps de propagation (moyenne) ( $\mu$ s)	Moyenne de Vitesse d'Ultra- sons (m/s)
28 Jours	Témoins	01	0,15	33,7	33,5	33,6	33,6	33,9	4427
		02	0,15	34,4	33,9	33,9	34,1		
		03	0,15	33,8	33,7	34,4	34,0		
	5%	01	0,15	34,2	34,1	34,9	34,4	34,5	4345
		02	0,15	34,4	35,2	34,9	34,8		
		03	0,15	34,2	34,4	34,4	34,3		
	15%	01	0,15	35,2	36,6	35,4	35,7	35,5	4220
		02	0,15	37,5	34,9	35,2	35,9		
		03	0,15	36,2	34,2	34,7	35,0		
	25%	01	0,15	41,2	37,7	38,2	39,0	39,0	3846
		02	0,15	39,7	38,6	37,7	38,7		
		03	0,15	41,2	38,6	38,1	39,3		
	35%	01	0,15	45,7	42,4	42,7	43,6	43,8	3423
		02	0,15	46,1	42,7	41,7	43,5		
		03	0,15	42,9	42,9	47,2	44,3		
	45%	01	0,15	49,8	49,4	54,7	51,3	52,1	2876
		02	0,15	48,7	47,9	58,5	51,7		
		03	0,15	48,2	47,9	64,2	53,4		
	50%	01	0,15	53,6	50,1	67,7	57,1	57,3	2617
		02	0,15	54,7	51,4	74,3	60,1		
		03	0,15	54,2	51,6	58,1	54,6		
	55%	01	0,15	81,9	100	83,1	88,3	84,9	1767
		02	0,15	80,3	80,9	102	87,7		
		03	0,15	76,7	77,7	81,3	78,6		
	60%	01	0,15	322	380	460	387,3	358,2	418
		02	0,15	330	225	400	318,3		
		03	0,15	388	277	442	369,0		

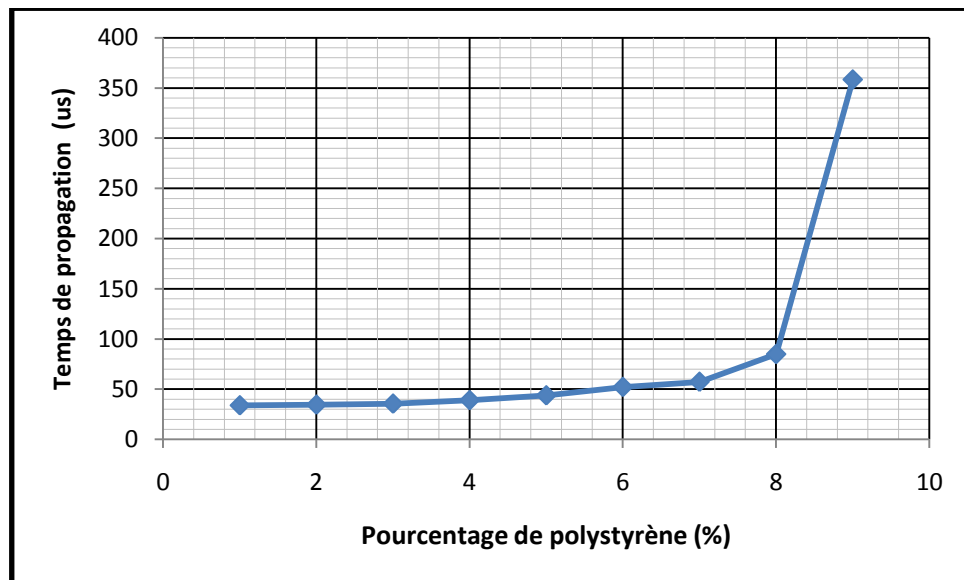


Figure VI.3. Temps de propagation en fonction du pourcentage de polystyrène.

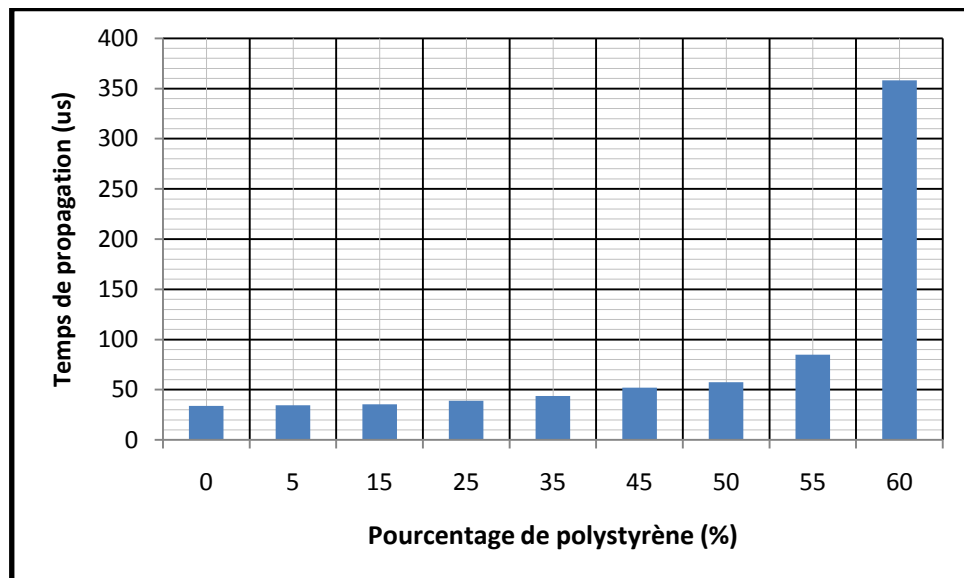


Figure VI.4. Temps de propagation en fonction du pourcentage de polystyrène.

#### Commentaire :

A partir les figures (VI.3- VI.4) représentes les graphes de temps en fonction de pourcentage de polystyrène.

On n'observe que le temps moyen des séries des échantillons augment avec le pourcentage de polystyrène expansé.

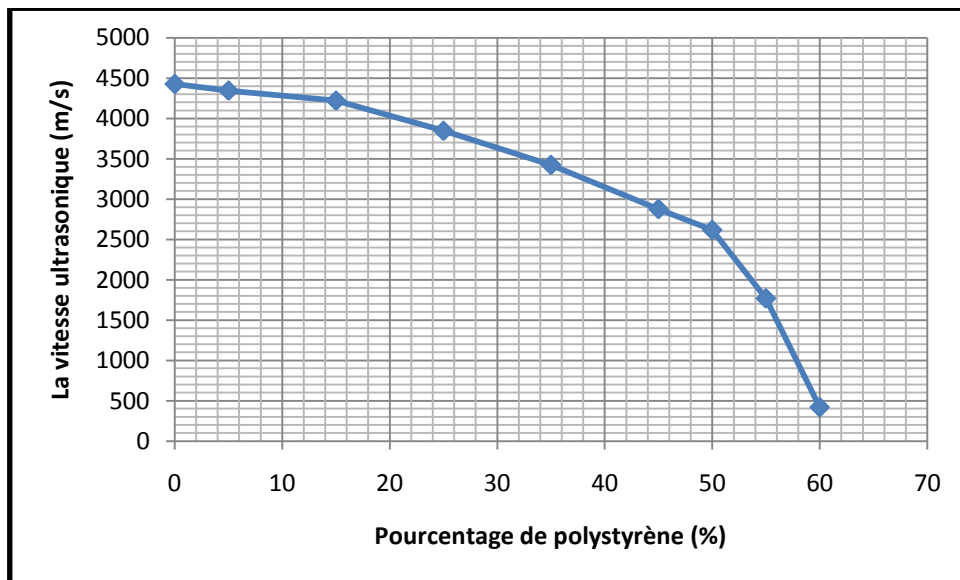


Figure VI.5. La vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage de polystyrène.

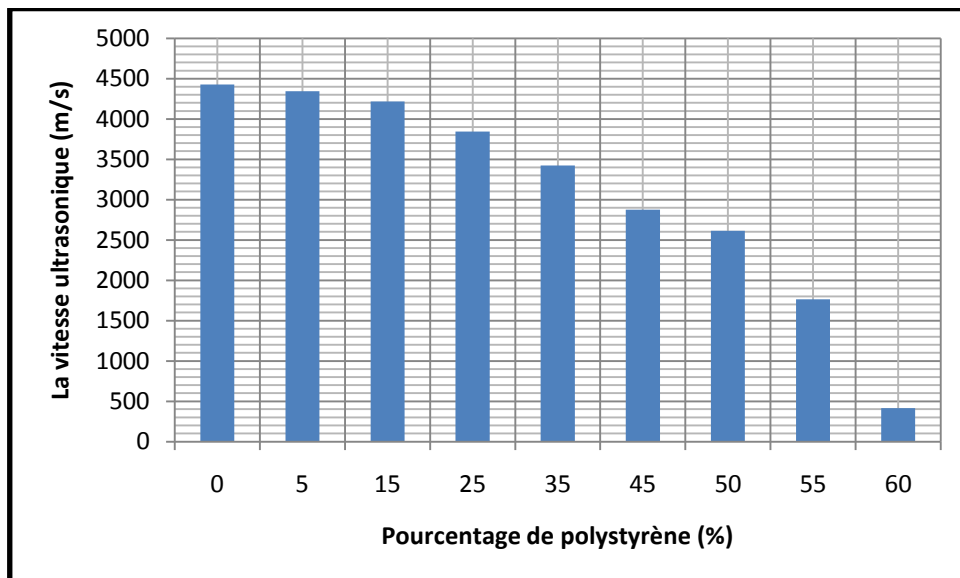


Figure VI.6. La vitesse ultrasonique en fonction du pourcentage de polystyrène.

**Commentaire :**

A partir des figures (VI.5 - VI.6) qui représentent la variation de vitesse en fonction de concentration de polystyrène expansé, on peut remarquer:

La vitesse ultrasonique dans les séries est inversement proportionnelle aux pourcentages du polystyrène expansé.

Puisque la vitesse ultrasonique est fonction de la densité du matériau, et la densité du polystyrène est faible, il y a atténuation de cette propagation..

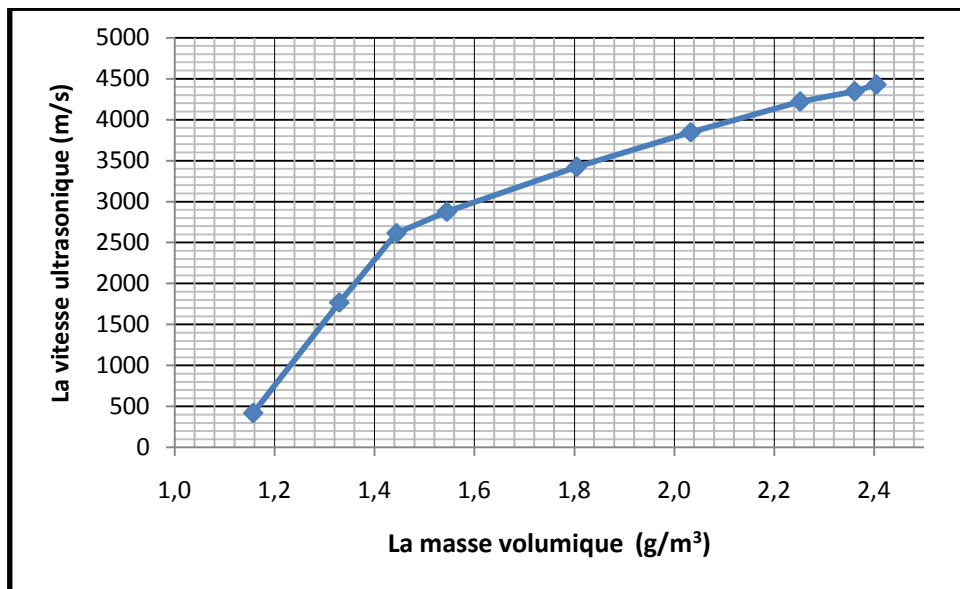


Figure VI.7. La vitesse ultrasonique en fonction de la masse volumique.

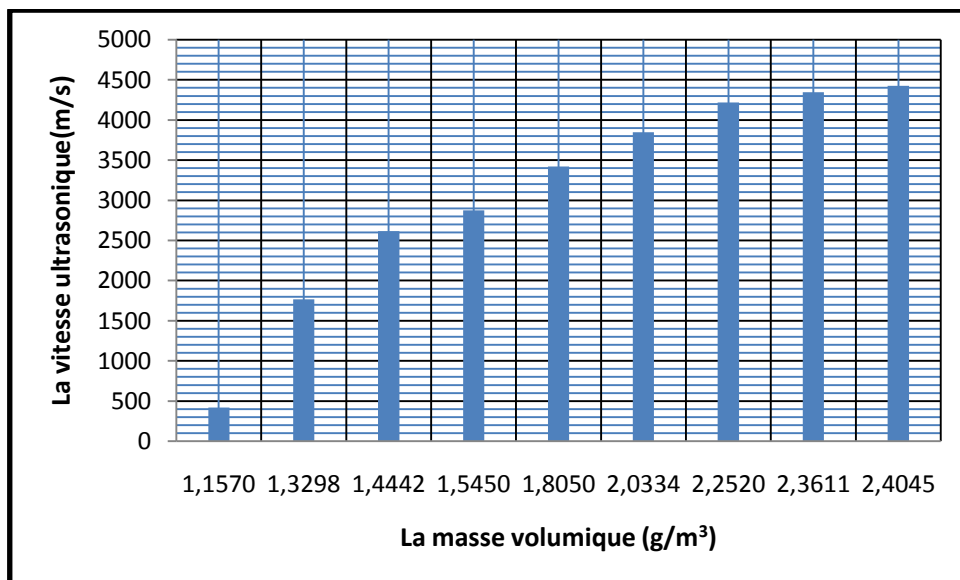


Figure VI.8. La vitesse ultrasonique en fonction de la masse volumique.

#### Commentaire :

A partir de les figures (VI.7 - VI.8) représente les graphes de la vitesse moyenne en fonction de la masse volumique.

On n'observe que la vitesse moyenne des séries des échantillons augment avec l'augmentation de la masse volumique.

# *CONCLUSIONS GÉNÉRALES*

### *CONCLUSIONS GÉNÉRALES*

Le but escompté de ce travail est de faire ressortir une optimisation entre le soulagement en poids du béton et la vitesse ultrasonique.

Sachant qu'il existe une corrélation entre la vitesse ultrasonique et la résistance mécanique par l'intermédiaire de la corrélation entre la densité et cette vitesse ultrasonique.

Cette étude a montré qu'on ne peut pas aller indéfiniment dans ce soulagement de la masse volumique du béton, car à certain pourcentage d'incorporation du polystyrène (60%) les éprouvettes deviennent névralgiques même aux déplacements d'un endroit à un autre.

En effet le pourcentage de 60% a laissé l'éprouvette s'effriter toute seule et différentes essais ont été entachés de beaucoup d'incertitudes d'ordre géométrique, ce qui a nécessité tout simplement son écartement.

Néanmoins, nous pouvons noter que nous avons ressenti une certaine logique entre la régression de la masse volumique en fonction de l'augmentation des pourcentages de polystyrène.

Cette logique nous permet en effet d'entreprendre une optimisation du pourcentage de polystyrène en vue de concevoir un béton léger et compatible avec sa résistance de l'état ultime limite de service envisagé.

# *Références Bibliographiques*

- [1] Mr BOUFEDAH BADISSI AHMED : mémoire de magister « influence de la granularité (classe granulaire 4/22.5) sur les caractéristiques des granulats et sur prospérité de béton
- [2] <http://www.la.refer.org/materiaux/aide.html> (Monsieur Vimane PHOUMMAVONG Vice-doyen et Professeur à la Faculté d'Ingénierie
- [3] Norme Française NF P 15-301, Juin 1994, "Liants Hydrauliques – Ciments Courants : Composition, Spécifications et Critères de Conformité", Éditions AFNOR, Paris 1994.
- [4] Norme Européenne NF EN 197 -1,Fév. 2001, " Ciments- Partie 1 : Composition, Spécifications et Critères de Conformité des Ciments Courants " , Éditions AFNOR, Paris 2001
- [5] Mémoire de magister, présenter par : Mr BOUFEDAH BADISSI AHMED (influence de a granularité (classe 4/22,4) sur les caractéristiques des granulats et sur les propriétés des bétons ordinaires) Université MENTOURI Constantine ; janvier 2011
- [6] Norme Française XP P 18-303, Aout. 1999, "Eau de Gâchage pour Béton", Éditions AFNOR, Paris, 1999.
- [7] Erner, A., Henry, J.F., Billon, N. Mechanical dissipation during plug assisted thermoforming of polystyrene as mesured by infrared thermography; ESAFORM'2004 Conf. Proc., Trondheim, Norway (2004)
- [8] Yamura, K., Yamauchi, M. Use of polystyrene pieces for aggregate of concrete; Proc. Annual conf. of Chugoku-Shikoku Branch of JSCE, Japan pp. 295- 29, (1982).
- [9] BARON. J ET OLLIVIER.J : « les bétons : bases et données pour leur formulation » édition eyrolles. 1999 »
- [10] Contexte normatif des bétons : mise en page et réalisation : a principe paris (édition septembre 2005)
- [11] LYES BAL : THESE DE DOCTORAT « modalisation du retrait et du fluage du béton par réseaux de neurones
- [12] MOHAMED MASMOUDI : thèse de doctorat (modélisation de la propagation d'ondes guidées, générées et détectées par transducteurs ultrasonores à couplage air. application au CND de structures aéronautiques composites).
- [13] YANN LE BIHAN : (modélisation du contrôle non destructif par courants de Foucault : approche basée sur la méthode des éléments finis)
- [14] CYRIL RAVAT : (conception de multi capteurs à courants de Foucault et inversion des signaux associés pour le contrôle non destructif)
- [15] A. HAMAMATSU, S. MAEDA ET H. NISHIYAMA: statistical threshold method for

# Références Bibliographiques

semiconductor wafer inspection. In apcndt 2006 - research & materials, janvier 2007.

[16] D. STIFTER, M. WURM, K. WIESAUER, K. NAGEL, M. PIRCHER, E. GÖTZINGER ET C. HITZENBERGER: spectral-domain optical coherence tomography: a novel and fast tool for ndt. in ndt in progress 2007, November 2007.

[17] technique de base (le contrôle non destructive) fiche 43

[18] G.-R. TILLACK, C. NOCKEMANN ET C. BELLON: x-ray modeling for industrial applications. ndt & e international, 33(7):481–488, October 2000.

[19] N. CHILD: x-ray techniques provide real-time proof of foam filter performance in steel castings. Foundry practice

[20] M. KLANK, O. HAGEDORN, C. HOLTHAUS, M. SHAMONIN ET H. DÖTSCH: characterization and optimization of magnetic garnet films for magneto-optical visualization of magnetic field distributions. NDT & e international,

[21] H.L. LIBBY: introduction to electromagnetic non-destructive methods. roberty kriegler publishing company, 1979.

[22] V. ZILBERSTEIN, K. WALRATHA, D. GRUNDYA, D. SCHLICKERA, N. GOLDFINEA, E. ABRAMOVICIB ET T. YENTZERC: mwm eddy-current arrays for crack initiation and growth monitoring. International journal of fatigue,

[23] M. CASTAINGS : simulation du contrôle non destructive par ultrasons (université bordeaux 1 – laboratoire de mécanique physique)

[24] « ultrasons de haute intensité », applications industrielles, éd dunod, paris 1971.

[25] « les ultrasons et leurs applications », presses universitaire de France, paris

[26] MARIE-AUDE PLOIX THESE DE DOCTORAT : (étude de l'atténuation des ondes ultrasonores application au CND des soudures en acier inoxydable austénitique)

[27] ZAHIRA GHALMI :( contribution au développement d'un capteur ultrasonique pour mesurer l'épaisseur de la glace)

[28] H. JEONG, D.K. HSU, „experimental analysis of porosity induced ultrasonic attenuation and velocity change in carbon composites“, ultrasonic,

[29] M. GOUEYGOU, Z. LAFHAJ, F. SOLTANI, „assessment of porosity of mortar using ultrasonic rayleigh waves

[30] BROWN B ET GOODMAN J.E. « ultrasons de haute intensité », applications industrielles, ed dunod, paris 1971.

[31] RISTIC V., « principes of acoustic devices ». John wiley & sons, New York 1983.

[32] centre national d'études et de recherches intégrées du bâtiment

[33] GOE 80. GOEBBELS K., structure analysais by scattering ultrasonic radiation, in: r.s. sharpe. researchs techniques in nondestructive testing, chapter 4, new york academic press, new

# Références Bibliographiques

york, 1980, chapter 4, p. 87-157.

[34] centre de recherches de l'industrie cimentière (la construction en béton des ouvrages d'épuration des eaux

[35] TRAN NGOC THANH : THESE DE DOCTORAT (valorisation de sédiments marins et fluviaux en technique routière)

[36] acoustique des milieux poreux (livre)

[37] YOHANN LEDRU : thèse de doctorat (étude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques

[38] MAXIME NICOLAS (écoulements dans les milieux poreux)

[39] digests de la construction au canada publications de l'irc-cnrc (structure des matériaux poreux de construction)

[40] J.P. MATHIEU, A. KASTLER, P. FLEURY, dictionnaire de physique, 2<sup>e</sup> édition, masson eyrolles, paris, 1985

[41] PROFESSEURS : DOMINIQUE CHAPPELLIER & JEAN-LUC MARI (cours en online de géophysique)

[42] Granulats - Analyse granulométrique par tamisage

[43] La norme NF P 18-561 définit les modalités de sa mesure

[44] Norme Française P 18-598, Oct.1991, "Granulats-Équivalent de sable", Edition AFNOR, Paris, 1991.

[45] Bennaoui Yassine, Zaitar Samra (Formulation et caractéristique du béton au milieu agressive) Mémoire de master, M'sila 2010, pp32-34.

[46] [http://www.google.dz/imgres?client=firefox-a&hs=Fx3&rls=org.mozilla%3Afr%3Aofficial&channel=sb&biw=1280&bih=642&tbm=isch&bnid=LuDzFRcooDJr7M%3A&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.la.refer.org%2Fmateriaux%2Fchapitre\\_trois\\_quatre.html&docid=T1waLn9H\\_ZPWpM&imgurl=http%3A%2F%2Fwww.la.refer.org%2Fmateriaux%2Fimages%2F3\\_4\\_1\\_14.gif&w=518&h=249&ei=3DErU83OHdC20QXw34GADA&zoom=1&ved=0CHYQhBwwDQ&iact=rc&dur=224&page=1&start=0&ndsp=19](http://www.google.dz/imgres?client=firefox-a&hs=Fx3&rls=org.mozilla%3Afr%3Aofficial&channel=sb&biw=1280&bih=642&tbm=isch&bnid=LuDzFRcooDJr7M%3A&imgrefurl=http%3A%2F%2Fwww.la.refer.org%2Fmateriaux%2Fchapitre_trois_quatre.html&docid=T1waLn9H_ZPWpM&imgurl=http%3A%2F%2Fwww.la.refer.org%2Fmateriaux%2Fimages%2F3_4_1_14.gif&w=518&h=249&ei=3DErU83OHdC20QXw34GADA&zoom=1&ved=0CHYQhBwwDQ&iact=rc&dur=224&page=1&start=0&ndsp=19)

[47] Norme Française P 18-555, Déc.1990, "Granulats-Mesures des masses volumiques, Coefficient d'Absorption et Teneur en Eau des sable", Edition AFNOR, Paris, 1990.

[48] IGC (TEC 187-TP- Mesure de la masse volumique)

[49] <http://fr.scribd.com/doc/45222078/Travaux-Pratiques-Materiaux-de-Construction>

[50] Norme Française P 18-554, Déc.1990, "Granulats-Mesures des masses volumiques, de la Porosité, du Coefficient d'Absorption et de la Teneur en Eau des Gravillon et Cailloux", Edition AFNOR, Paris, 1990.

[51] Norme Algérienne NA 442,2000, "Liants Hydrauliques - Ciments Courants :

# Références Bibliographiques

Composition, Spécifications et Critères de Conformité ‘’, Edition IANOR, Alger, 2000.

[52] Présentée par : IZABELA GAWESKA HAGER (comportement à haute température des bétons à haute performance – évolution des principales propriétés mécaniques) l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, novembre 2004.

[53] Norme Française P 18-573, Déc.1990, ‘Granulats-Essai Los Angeles’, Edition AFNOR, Paris, 1990.

[54] CASTILLO, M. ALONSOA,C., ANDRADEA,C., TURRILLASA,X., CAMPOC,J., ‘Composition and micro structural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction’, Cement and concrete Research 34 (2004)1633-1644.

[55] Norme Française P 18-572, Déc.1990, ‘Granulats-Essai Micro Deval’, Edition AFNOR, Paris, 1990.

[56] [http://www.ente-aix.fr/documents/135-geotechnique/3\\_ClassificationSols/res/res\\_4\\_FicheMicroDeval.pdf](http://www.ente-aix.fr/documents/135-geotechnique/3_ClassificationSols/res/res_4_FicheMicroDeval.pdf)

[57] [http://www.colas.com/fichiers/fckeditor/File/pdf/mesure\\_essai/24-colas.pdf](http://www.colas.com/fichiers/fckeditor/File/pdf/mesure_essai/24-colas.pdf)

[58] [http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre\\_trois\\_quatre.html](http://www.la.refer.org/materiaux/chapitre_trois_quatre.html)

[59] Article : N. Tebbal, Z. Rahmouni

[60] Y. Couasent (propreté et caractéristiques des matériaux de construction) Edition le Moniteur.2003

[61] George. Dreux ‘Nouveau guide du béton’ Edition Eyrolles. Paris 1998.

A. Komar ‘Matériaux et éléments de construction’ MIR. Moscou.1978.

[62] George. Dreux ‘Nouveau guide du béton’ Edition Eyrolles. Paris 1998.

[63]<http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CDYQFjAB&url=http%3A%2F%2Fs3.e-monsite.com%2F2011%2F01%2F20%2F34957383chapitre-3-methodes-de-formulation-des-betons-pdf.pdf&ei=UAI6U8jlGKGAYwOV3oCYDw&usg=AFQjCNFn1x6xCiPg-Txcdl6MhYIESqmFGg&bvm=bv.63934634,d.bGQ>

[64] Norme Européenne NF EN 12390-1, Oct. 2001, ‘Essai pour Béton Durci – Partie 1 : Forme, Dimensions et autres Exigences relatives aux Éprouvettes et aux Moules’, Éditions AFNOR, Paris, 2001.

[65] Norme Française NF P 18-404, Déc. 1981, ‘Béton – Essai d’Etude, de convenance et de Contrôle – Confection et Conservation des Éprouvettes’, Éditions AFNOR, Paris, 1999

[66] Présentée par : IZABELA GAWESKA HAGER (comportement à haute température des bétons à haute performance – évolution des principales propriétés mécaniques) l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et l'Ecole Polytechnique de Cracovie, novembre 2004.

## Références Bibliographiques

[67]

[http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0CFUQFjAH&url=http%3A%2F%2Fwww.popec.fr%2FDMD%2Fged%2FPUBLIC%2Ffiches\\_memento%2Fmethodes\\_essais\\_beton.pdf&ei=5PE5U4SxFc\\_RsgaE74DgDw&usg=AFQjCNEP9XWhFIHAC-wmhEL9kMSKa0WJqA&bvm=bv.63808443,d.Yms](http://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0CFUQFjAH&url=http%3A%2F%2Fwww.popec.fr%2FDMD%2Fged%2FPUBLIC%2Ffiches_memento%2Fmethodes_essais_beton.pdf&ei=5PE5U4SxFc_RsgaE74DgDw&usg=AFQjCNEP9XWhFIHAC-wmhEL9kMSKa0WJqA&bvm=bv.63808443,d.Yms)

[68] Norme Européenne NF EN 12350-6, Déc. 1999, ‘‘Essai pour Béton Frais – Partie 6 : Masse Volumique’’, Éditions AFNOR, Paris, 1999.

[69] Norme Européenne NF EN 206-1, Fév. 2002, ‘‘Béton – Partie 1 : Spécification Performances, Production et Conformité’’, Éditions AFNOR, Paris, 2002.

[70] Norme Européenne NF EN 12390-7, Sept. 2001, ‘‘Essai pour Béton dURCI – Partie 7 : Masse Volumique du Béton’’, Éditions AFNOR, Paris, 2001.

[71] F. Gabrysiak - Matériaux – Les Bétons – Chapitre 4

[72] Norme Française P 18 -418, Déc. 1989, ‘‘Béton – Auscultation Sonique, Mesure du Temps de Propagation d’Ondes Soniques dans le Béton’’, Éditions AFNOR, Paris, 1989.

[73] Norme Européenne NF EN 12390-3, Fév. 2003, ‘‘Essai pour Béton Durci – Partie 3 : Résistance à la Compression des Éprouvettes ’’, Éditions AFNOR, Paris, 2003.

الحمد لله  
الذي هدانا لهذا  
الذي كنا لنهتدي لہ  
لو اننا لم نكن  
نؤمن بالآيات  
التي انزلنا  
عليك يا محمد  
فان كنا لنهتدي  
للوحي لولم  
نؤمن بالآيات  
التي انزلنا  
عليك يا محمد