



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : Génie Civil et d'Architecture

DEPARTEMENT : Génie civil

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : DJEKIDEL Soukaina & GUENANE Nour el Houda

DOMAINE : Sciences et techniques

FILIERE : Génie civil

OPTION : Structure

Thème

Etude de propagation des fissures dans un mortier à base des différents sables soumis à des sollicitations simples

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
Mr. MERAH Ahmed	MCA	Président
Mme. GOTTEICHA Messaouda	MAA	Examineur
Mr. GOUAL Idriss	Pr	Encadreur
Mr. FERHAT Ahmida	MAA	Co-encadreur

Promotion : juin - 2018

Remerciement

Au terme de ce travail, nous tenons à remercier en premier lieu Allah le Miséricordieux qui nous a données la force, le courage et la volonté d'achever cette modeste réalisation.

Nous adressons nos vifs et sincères remerciements à Monsieur GOUAL Idriss, Professeur à l'université Amar Têlîdji de Laghouat et Monsieur FERHAT Ahmida, enseignant chercheur à l'université de Laghouat qui ont bien dirigé les étapes d'élaboration de ce mémoire avec ses précieux conseils, ses compréhensions, et ses aides inestimables. Qu'ils trouvent ici l'expression de toutes nos gratitude.

Nous voudrions remercier Monsieur le docteur MERAH Ahmed d'avoir accepté de présider ce mémoire, et Madame GUOTTEICHA Messaouda qui a eu le temps d'examiner notre travail, et qui ont honorés ce mémoire. Trouvent ici l'expression de nos profonds respects.

Egalement, nous tenons à remercier tous les enseignants du département de Génie Civil et tous les membres du laboratoire de Génie Civil à l'université à Amar Têlîdji de Laghouat.

Nous remercions aussi Monsieur OULAD KHAOUA Younes, doctorant au département de Génie Civil à l'université à Amar Têlîdji de Laghouat, et Monsieur SAHRAOUI Boudali, le chef labo au Contrôle Technique de Construction pour leurs aides et leurs disponibilités.

Nos remerciements à tous ceux qui nous ont soutenus et encouragés, de près ou de loin, durant la réalisation de ce mémoire et pour leur contribution inestimable, trouvent ici tous nos respects.



DEDICACES

Pour que ma réussite soit complète je la partage avec toutes les personnes que j'aime, je dédie ce modeste travail à :

*A mes très chers parents **Lakhdar** et **Yamina** qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin, ma mère qui a été à mes côtés et ma soutenu durant toute ma vie, et mon père qui a sacrifié toute sa vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci mes parents.*

*A mes chers frères : **Mohamed**, **Abdellatif**, **Belkaid**, pour le courage et la volonté qu'ils m'ont inculqués.*

*Mes chères sœurs : **Fatima Zahra**, **Aicha** et ma petite sœur **Farzana**.*

*Mon fiancé : **BOURAKNA Mohamed**.*

*A l'esprit ma chère tante : **BEN MAIZA Rim** que dieu ait pitié d'elle.*

*Et à toute la famille **DJEKIDEL**, **BEN MAIZA** et **TIDJANI***

*Touts Mes amies spécialement : **Nesrine** et **Imane**.*

*Ma chère binôme : **Nour El Houda**.*

*Tous les enseignants qui m'ont dirigé vers la porte de la réussite.
Ainsi que toute la promotion de Génie Civil 2017/2018.*

Tous ceux qui me connaissent et a tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.



ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى فهم ظاهرة انتشار التشققات على مونة خاضعة لضغوط بسيطة وتأثيرها على قدرتها على التحمل، ومدى قابليتها للخدمة والديمومة، حيث تركزت هذه الدراسة على ثلاثة أنواع من المونة، مصنوعة من ثلاثة أنواع من الرمل (الكثبان، الوادي، الجيري) بعد دراسة المواد الأساسية وصياغة أنواع المونة الثلاث، تضمن البرنامج التجريبي دراسة تطور المقاومة الميكانيكية للضغط والانحناء لأنواع المونة المنجزة بدلالة الزمن، ولدراسة تأثير زيادة الحمل على ظهور الشقوق تم إجراء قياس سرعة الصوت قبل و أثناء إجراء اختبارات الانحناء لكل زمن مسجل، ومن خلال النتائج المحصل عليها، تم تسليط الضوء على تأثير نوع الرمل على المقاومة الميكانيكية وظهور و انتشار الشقوق، وفي الأخير إن الطبيعة الجيرية والشكل الزاوي للحبيبات وارتفاع القطر الأقصى والتوزيع الحبيبي الجيد لهم أثر كبير على السلوك الميكانيكي ومقاومة ظهور وانتشار الشقوق.

RESUME

Cette étude vise à appréhender le phénomène de l'apparition et la propagation des fissures dans un mortier à base des différents sables soumis à des sollicitations simples et ses effets sur sa capacité portante, sa servicibilité et sa durabilité. L'étude est portée sur trois mortiers élaborés à base des trois sables (dunaire, alluvionnaire et calcaire). Après caractérisation des matériaux de base et formulation des trois mortiers. Un programme expérimental comporte l'étude de l'évolution des résistances mécaniques, à la compression et à la flexion, de nos mortiers en fonction du temps. Des essais de mesure de la vitesse d'auscultation dynamique, pour chaque temps de conservation, avant essais de flexion et en cours de l'essai, sont effectués dont l'objectif d'étudier l'effet de l'apparition et la propagation des fissures. En fin, la nature calcaire la forme anguleuse des grains, le diamètre maximal élevé, la bonne répartition granulaire ont donnés relativement un grand effet sur le comportement mécanique et la résistance à l'apparition et la propagation des fissures.

ABSTRACT

The aims of this study is understanding the phenomenon of the appearance and the propagation of the cracks in a mortar based on different sand subjected to simple solicitations and its effects on its bearing capacity, its servicability and its durability. The study is focused on three mortars made from three sands (dune, alluvial and limestone). After characterization of the basic materials and formulation of the three mortars. An experimental program involves the study of the evolution of the mechanical resistance to compression and bending of our mortars as a function of time. Tests for measuring the speed of dynamic auscultation, for each conservation time, before flexural tests and during the test, are carried out whose objective is to study the effect of the appearance and propagation of cracks. Finally, the calcareous nature of the angular shape of the grains, the high maximum diameter, and the good granular distribution gave relatively great effect on the mechanical behavior and resistance to the appearance and propagation of cracks.

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I.1 : Les catégories d'emploi des granulats

Tableau I.2 : Types de ciment selon la nature et la proportion de leur constituant

Tableau I.3 : Types des adjuvants

Chapitre II

Tableau II.1 : Valeur préconisées pour l'équivalent de sable

Tableau II.2 : Les caractéristiques des sables étudiés

Tableau II.3 : Composition chimique du ciment

Tableau II.4 : Caractéristiques physiques et mécaniques de ciment utilisé

Tableau II.5 : Classification de consistance

Tableau II.6 : Résultats de l'essai de maniabilité

Tableau II.7 : Composition des mortiers étudiés

Chapitre III

Tableau III.1 : Les relations établies entre « V » et « $aR = R_{fi}/R_{fmax}$ »

Tableau III.2 : Les relations établies entre les modules d'élasticité « E_d , $E_d(v)$ et E_c » et le
taux d'accroissement de la charge « $aR = R_{fi}/R_{fmax}$ »

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1 : Le développement progressif des hydrates dans une pâte de ciment en cours d'hydratation

Figure I.2 : Relation entre la résistance de compression R et le rapport E/C selon la formule de féret

Figure I.3 : Evolution de la porosité d'une pâte de ciment en fonction du E/C

Figure I.4 : Evolution de la résistance du béton à la compression et à la traction

Figure I.5 : La disposition des armatures

Figure I.6 : Tassement de béton bloqué par le lit supérieur d'armature

Figure I.7 : Principe de répartition des températures dans un élément en béton

Figure I.8 : Fissuration liée à la liaison entre béton armé et maçonnerie

Figure I.9 : Fissuration liée à l'épaisseur du béton

Figure I.10 : Fissuration liée au tassement d'appui

Figure I.11 : Fissuration liée à l'adaptation de fonctionnement des structures

Figure I.12 : Le joint de dilatation

Figure I.13 : Evolution de la carbonatation

Figure I.14 : Un fissuromètre

Figure I.15 : Types de fissures

Figure I.16 : Zones délimitant le voisinage d'une pointe de fissure

Figure I.17 : Appareil d'ultrason

Figure I.18 : Appareil d'auscultation sonique avec oscilloscope

Figure I.19 : Manières de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons

Figure I.20 : Courbes de calibrages

Figure I.21 : Courbe de RILEM

Figure I.22 : Corrélation Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique

Figure I.23 : Comparaison de différentes valeurs de module d'élasticité

Chapitre II

Figure II.1 : Types de sables utilisés

Figure II.2 : Essai de la masse volumique apparent

Figure II.3 : Essai de la masse volumique absolue

Figure II.4 : Essai d'analyse granulométrique

Figure II.5 : Courbes granulométriques des sables étudiés

Figure II.6 : Essai d'équivalent de sable

Figure II.7 : Essai d'absorption d'eau

Figure II.8 : Schéma des étapes de l'essai d'écoulement au maniabilimètre B

Figure II.9 : Eprouvettes prismatiques utilisées

Figure II.10 : Confection des éprouvettes

Figure II.11 : Conservation des éprouvettes

Figure II.12 : Dispositif pour l'essai de résistance à la flexion (3 points)

Figure II.13 : Eprouvette après essai de flexion (trois points)

Figure II.14 : Dispositif pour l'essai de compression simple

Figure II.15 : Eprouvette après essai d'écrasement en compression simple

Figure II.16 : Appareil de l'ultrason utilisé

Figure II.17 : Etalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau

Figure II.18 : Eprouvette avec la disposition des transducteurs

Chapitre III

Figure III.1 : Résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers étudiés

Figure III.2 : Résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers étudiés

Figure III.3 : Variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques en fonction de l'âge de conservation pour les trois mortiers étudiées

Figure III.4 : Etat de surface de la fissure des trois mortiers étudiés après essai de flexion

Figure III.5 : Variation de la vitesse du son en fonction du taux d'accroissement de la résistance à la flexion pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation

Figure III.6 : Corrélation entre la Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique pour les différents mortiers étudiés

Figure III.7 : Corrélation entre la Résistance à la flexion– Vitesse ultrasonique pour les différents mortiers étudiés

Figure III.8 : Comparaison de différentes valeurs de module d'élasticité (statique et dynamique) estimés pour les différents mortiers étudiés

Figure III.9 : Variation du module d'élasticité dynamique E_d (BAEL91) en fonction du taux d'accroissement de la résistance à la flexion pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation

Figure III.10 : Variation du module d'élasticité dynamique $E_d(v)$ (selon la vitesse du son) en fonction du taux d'accroissement de la résistance à la flexion pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation

Figure III.11 : Variation du module d'élasticité statique E_c (selon la vitesse du son) en fonction du taux d'accroissement de la résistance à la flexion pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

INTRODUCTION GENERALE 1

Table des matières

Chapitre I Synthèse bibliographique : Etat de connaissance autour du béton et de sa fissuration

1. INTRODUCTION	3
2. LE BETON.....	4
Composition du béton.....	4
caractéristiques du béton.....	4
Les granulats.....	5
Le ciment.....	5
L'eau de gâchage.....	7
Les adjuvants.....	9
Formulation du béton	9
l'évolution de la résistance du béton.....	10
L'intégrations de la fissuration dans les règles de dimensionnement du béton armé	12
3. LA FISSURATION DU BETON	13
La qualité du matériau	13
Le ressuage	13
Le retrait	13
La mise en œuvre.....	15
L'ajout d'eau	15
Les conditions climatiques	15
Les liaisons entre éléments de structures.....	15
La mise en place des armatures	16
Les réseaux divers	17
La vibration	17
Le fonctionnement de la structure	17
Le fonctionnement structurel mécanique	17
Le fonctionnement structurel thermique.....	19
Les facteurs chimiques	20

La carbonatation du béton	20
L'attaque par les chlorures	21
L'attaque sulfatique	21
L'alcali-réaction	21
4. LA FISSURE ET LA PATHOLOGIE.....	22
Caractéristiques des fissures.....	22
Propagation de fissure	24
5. Mesures de la propagation de la fissure	25
Essai d'auscultation dynamique	26
Introduction	26
Principe.....	26
Mode Opérateur.....	28
Paramètres influents la vitesse des ultrasons	30
Les avantages de l'essai aux ultrasons	31
Interprétation des résultats de mesure aux ultrasons	31
6. CONCLUSION.....	34

Chapitre II Caractérisation des Matériaux et Procédures d'essai

1. INTRODUCTION.....	35
2. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISE.....	35
Présentation des matériaux utilisés.....	35
Les sables	35
Le ciment.....	42
2.1.3. L'eau de gâchage.....	43
3. FORMULATIONS ET CONFECTION DES MORTIERS	43
Essai d'écoulement au maniabilimètre B	43
Formulation des mortiers de sable étudiés	44
Confection des éprouvettes.....	44
Conservation des éprouvettes	45
4. ESSAIS SUR LES MORTIERS DURCIS.....	46
Essais destructifs	46
Essais de résistance à la traction par flexion à trois points.....	46
Résistance à la compression	48
4.5.2. Essais non destructifs (Essai de l'ultrason)	49
5. CONCLUSION.....	51

Chapitre III Présentation et Discussions des Résultats

1. INTRODUCTION	52
2. RESISTANCE MECANIQUE	52
3. ESSAIS D'AUSCULTATION DYNAMIQUE	53
Effet de nature des granulats et de la granulométrie.....	53
Effet de l'accroissement de la charge	55
Corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonique	57
Estimation des modules d'élasticité	59
Estimation des modules d'élasticité en fonction de l'accroissement de la charge	61
5. CONCLUSION.....	65

CONCLUSION GENERALE	67
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES	69



Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les problèmes de qualité rencontrés dans les structures en béton apparaissent à différentes phases de la réalisation des ouvrages et en service, c'est pour cette raison que depuis longtemps il y a une demande accrue pour des méthodes plus précises et, en même temps , plus souples d'évaluation de la qualité du béton.

Les structures en béton, lors de leur construction, sont soumises à plusieurs types de déformations dues à l'hydratation du ciment. Ces déformations du béton au jeune âge peuvent conduire à l'apparition des fissures sur les structures en cours de réalisation. Cette fissuration précoce du béton peut affecter l'aspect esthétique des ouvrages.

Le béton est un matériau poreux et fragile, doté d'une faible résistance à la traction donc sujet à la fissuration. Cette tendance à se fissurer réduit évidemment sa durabilité.

Le contrôle de la qualité du béton par essais destructifs nécessite la confection d'éprouvettes prélevées représentant un échantillon. Ce contrôle ne peut être effectué à 100 % ou tout au moins sur un échantillonnage significatif. De plus, l'échantillon prélevé n'est pas toujours représentatif du béton de la structure réelle. Ainsi, pour répondre à ces problèmes, on a développé une gamme d'essais in situ appelés «essais non destructifs» venant compléter les essais destructifs.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles.

Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

La résistance du béton ne dépend pas nécessairement du dosage en gros granulats ou de leur module d'élasticité. Mais elle dépend énormément de la nature des granulats, la granulométrie et des modifications de la pâte de ciment durci. C'est dans cette optique qu'on a opté dans cette étude d'étudier la propagation des fissures au niveau des mortiers. Pour cela, trois mortiers ont été élaborés à base de trois types de sables (dunaire, alluvionnaire et calcaire). Pour chaque mortier élaboré, des essais destructifs à savoir la résistance en compression et la résistance à la traction par flexion et des essais non destructifs par la mesure de la propagation des fissures par des essais d'auscultation dynamique (ultrason).

Ce mémoire est structuré comme suite :

- Le premier chapitre donne une recherche bibliographique (aperçu général) qui comporte une synthèse bibliographique sur le béton et leurs caractérisations à l'état frais et durci, ainsi que les types et la propagation des fissures dans les éléments structurels, enfin l'essai non destructif (ultrason) suivi par les avantages et les références normatives de l'essai.
- Le deuxième chapitre consacré à l'étude expérimentale, présente les caractéristiques des matériaux utilisés (compositions chimiques et propriétés physiques) pour le ciment et le sable et les essais sur matériaux utilisés (La masse volumique, Analyse granulométrique, Equivalant de sable, Absorption d'eau, ...etc.) ainsi que les essais réalisés sur béton à l'état frais (Essai d'écoulement au maniabilimètre) et à l'état durci par les essais non destructifs (ultrason) et les essais destructifs (la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion).
- Dans le troisième chapitre, on a présenté et discuté les résultats obtenus par les essais destructifs (la résistance à la compression, la résistance à la traction par flexion), et les essais non destructifs (ultrason).

Finalement, une conclusion générale qui propose une synthèse des résultats obtenus et des perspectives pour les recherches à venir sont présentées.

CHAPITRE I



Synthèse
Bibliographique :
Etat de connaissance
sur le béton et sa
fissuration

ETAT DE CONNAISSANCE SUR LE BETON ET SA FISSURATION

1. INTRODUCTION

Le béton est le matériau le plus utilisé dans tous les domaines de la construction et du bâtiment, malgré sa complexité. Il contient habituellement un mélange de ciment, d'eau et des granulats, mais il est considéré comme homogène. Non seulement, il peut être moulé dans les formes les plus diverses (coupole, voûte et des éléments avec des formes compliquées), mais aussi une excellente résistance à la compression et une grande rigidité.

Ces caractéristiques ont néanmoins limitées son utilisation : il est fragile (résistance au choc), il résiste mal à la traction et il est sujet à la fissuration dans le cas des éléments minces. Pour cela on ajoute des fibres (béton de fibre), qui peuvent apporter une meilleure réponse au problème de la fragilité du béton et minimiser le risque de fissuration ce qui permettrait d'améliorer sa durabilité et sa résistance. Il existe actuellement une grande variété de fibres.

Parmi les désordres les plus fréquents dans les structures en béton armé on trouve la fissuration. La présence de fissures sur une structure en béton témoigne généralement d'un endommagement de cet élément, donc l'analyse de l'influence de la variation de ce phénomène sur les propriétés mécaniques des bétons présente un intérêt indéniable, surtout pour toutes les réalisations où les aspects sécuritaires sont importants et tributaires des risques d'incendies imprévues, incontrôlées et brutales. Ce problème peut provoquer la rupture qui aura pour conséquence finale l'effondrement du matériau qui peut causer des pertes humaines et des dégâts matériels [1].

La connaissance exacte de ce type de désordre doit permettre en outre d'en comprendre la cause et de définir le type de réparation à envisager. Les fissures peuvent survenir dans le béton non durci, le béton en phase de durcissement ou le béton durci. Dans le cas du béton durci, Les fissures se forment lorsque les forces de traction dépassent la résistance à la traction du béton [1].

2. LE BETON

2.1. Composition du béton

Le béton est un assemblage de grains à peu-près inertes, les granulats lié par une pâte résultant de mélange de ciment, éventuellement d'additions minérales et/ou d'adjuvants organiques, d'eau, d'air et parfois de fibres.

2.1.1. Caractéristiques du béton

Les caractéristiques d'un béton, telles que sa mise en œuvre, son comportement mécanique et ses performances à long terme sont influencées par les propriétés des granulats qui le composent. Ces propriétés, spécifiques aux granulats, sont [2] :

- la nature minéralogique : la plupart des granulats conviennent pour le béton, il faut toutefois faire attention à l'emploi d'argiles ou de calcaires marneux qui peuvent altérer l'adhérence et engendrer des gonflements et des altérations du béton à terme;
- la granulométrie, ou la distribution des tailles des grains est importante pour obtenir une bonne composition du béton. Ainsi, la courbe granulométrique de chaque granulat doit respecter un fuseau de régularité défini par les normes qui distinguent 6 classes de granulats suivant leur dimension ;
- la teneur en eau : la quantité d'eau présente dans les granulats (humidité et absorption) est à considérer lors de la formulation du béton pour établir la quantité d'eau de gâchage à ajouter;
- l'affinité vis à vis des ciments : la nature des liaisons qui se manifestent à l'interface granulat/pâte de ciment, conditionne les résistances mécanique du béton [3] ;
- la résistance mécanique : l'obtention d'un béton de résistance mécanique élevée suppose que les granulats aient une résistance propre suffisante ;
- la densité : selon le type de granulat (calcaire, basalte,...) la densité n'est pas la même. Ainsi, selon les caractéristiques du béton désiré, il faudra utiliser des granulats avec une densité adaptée ;
- la propreté : la présence d'impuretés autour des grains peut perturber la réaction d'hydratation du ciment et par conséquent, entraîner des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte de ciment ;

- la finesse du sable : un sable grossier risque de nuire à la mise en œuvre et entraîner un ressuage doublé d'une ségrégation. A l'inverse, un sable fin peut pénaliser la résistance mais contribuer à la mise en œuvre [4];
- l'alcali réaction potentielle : certains granulats contenant une fraction significative de silice soluble et réactive sont susceptibles, dans un environnement riche en alcalin, de provoquer à leur périphérie la formation de gel gonflants [2] ;

La norme de référence des granulats est la norme NF EN 12620 « Granulats pour béton » et la norme française XP P 18-545 « Granulats – Eléments de définition, conformité et codification », qui classe les granulats selon 4 catégories :

Tableau I.1 : les catégories d'emploi des granulats

catégorie	Utilisation
A	Ouvrages d'art, BHP et bétons particuliers
B	Bâtiment
C	A éviter
D	A proscrire pour les bétons courants

2.1.1. Les granulats

Les granulats constituent le squelette du béton. Les granulats étant moins déformables que la matrice de ciment, ils induisent des fissures dans la pâte dues au retrait mais s'opposent à leur propagation. Ainsi, la résistance de la matrice est améliorée.

2.1.2. Le ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire qu'il a la propriété de durcir au contact de l'eau, et après durcissement, il conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. C'est le constituant fondamental du béton puisqu'il permet la transformation d'un mélange sans cohésion en un corps solide. La norme de référence de ciment est la norme algérienne NA 442.

La plupart des ciments est composée majoritairement de clinker, fabriqué à partir d'un mélange d'environ 80% de calcaire et 20% d'argile. Ils contiennent d'autres constituants éventuels, appelés fines complémentaires ou additions minérales telles que des fillers, des laitiers de haut-fourneau, des cendres volantes, des calcaires ou encore des fumées de silice [2,4,5]. Ces additions, par leur finesse, ont pour rôle de se substituer économiquement à une

partie du clinker en remplissant les espaces libres et par conséquent, elles contribuent à augmenter la compacité du squelette.

Tableau I.2 :Types de ciment selon la nature et la proportion de leur constituant [19]

Type de ciment	Désignation	Teneur en clinker	Teneur en % de l'un des constituants suivant : laitier – pouzzolanes - cendres – calcaires – schistes - fumées de silice	Teneur en constituants secondaires	Utilisation
Ciments Portland	CEM I	95 à 100%		0 à 5%	Ouvrages d'art
Ciments Portland composés	CEM II/A ou B	80 à 94% 65 à 79%	6 à 20% de l'un des constituants, sauf pour les fumées de silice limitées à 10% et les fillers à 5%; 21 à 35% avec les mêmes restrictions que ci-dessus		Bâtiment
Ciments de haut-fourneau	CEM III/A, B ou C	35 à 64% 20 à 34% 5 à 19%	36 à 65% de laitier de haut-fourneau 66 à 80% de laitier de haut-fourneau 81 à 95% de laitier de haut-fourneau		Ouvrages en milieux agressifs et industriels
Ciments pouzzolaniques	CEM IV/A ou B	65 à 90% 45 à 64%	10 à 35% de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice (limitées à 10%) 36 à 55% comme ci-dessus		Absent en France
Ciments composés	CEM V/A ou B	40 à 64% 20 à 39%	18 à 30% de laitier de haut-fourneau et 18 à 30% de cendres siliceuses ou de pouzzolanes 31 à 50% de chacun des 2 constituants		Ouvrages en milieux agressifs

			comme ci-dessus		
--	--	--	-----------------	--	--

D'un point de vue chimique [5], le ciment est essentiellement composé de :

- Silicate tricalcique -C₃S
- Silicate bicalcique -C₂S
- Aluminate tricalcique -C₃A
- Aluminoferrite tétracalcique -C₄AF

Lorsque le ciment est mis en présence d'eau, les réactions d'hydratation se développent et produisent une cristallisation du mélange qui aboutit à un système d'hydrates stables avec formation de cristaux en aiguilles plus ou moins enchevêtrées produisant la prise.

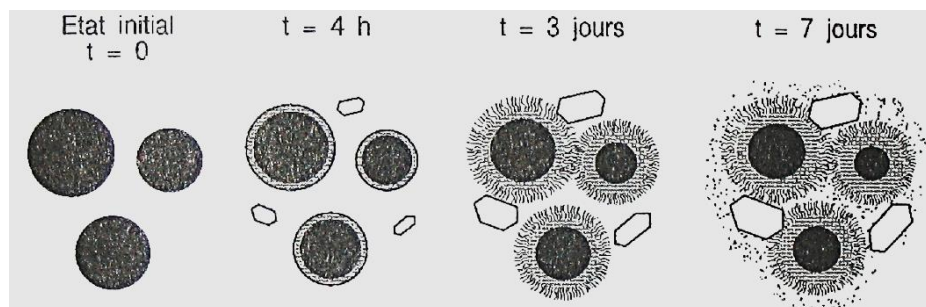


Figure I.1 : Le développement progressif des hydrates dans une pâte de ciment en cours d'hydratation [5]

2.1.3. L'eau de gâchage

N'importe quelle eau ne peut être utilisée dans la composition des bétons. La qualité de l'eau doit répondre à certaines exigences consignées dans la norme européenne NF EN 1008 : « Eau de gâchage pour béton ». L'eau distribuée dans les réseaux publics d'adduction convient en général.

La quantité d'eau à ajouter à la composition du béton doit prendre en compte la quantité d'eau totale contenue dans les granulats qui inclut la quantité d'eau à l'intérieur des pores des granulats poreux.

Le dosage en eau du béton est un paramètre important et délicat car l'eau agit sur 2

propriétés du béton de façon antinomique : la consistance et la résistance.

En effet, plus on met de l'eau dans un béton, plus son transport et sa mise en œuvre (remplir le coffrage, enrober les armatures,...) sont aisés car sa consistance est plus liquide pendant la phase dormante (béton frais).

- **Relation entre la résistance à la compression R et le rapport E/C**

Formule de Féret (1896):

$$R = k \cdot \sqrt{\left[1 + \frac{e + V}{C}\right]}$$

Ou :

e : volume d'eau par unité de volume de béton

V : volume d'air par unité de volume de béton

C : volume de ciment par unité de volume de ciment

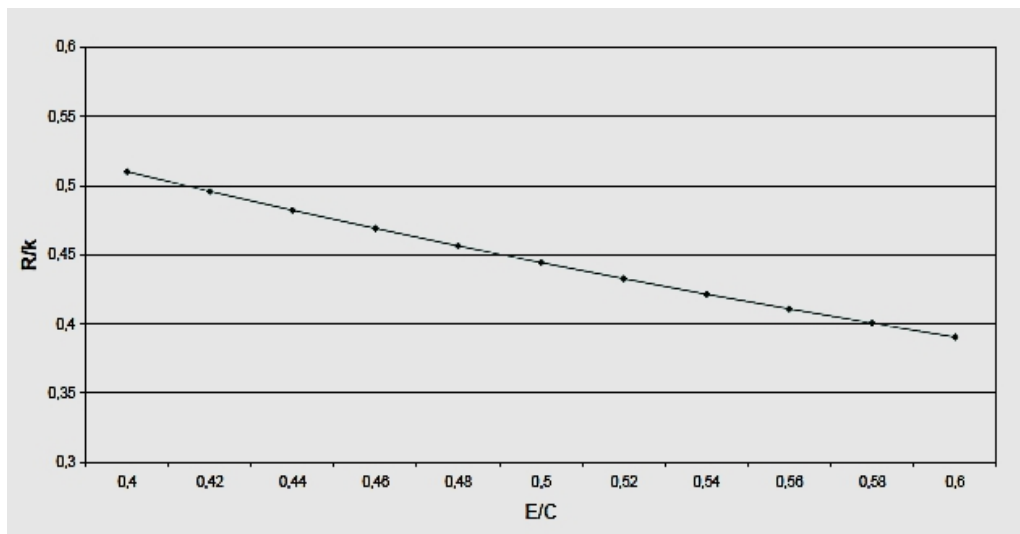


Figure I.2 : Relation entre la résistance de compression R et le rapport E/C selon la formule de féret

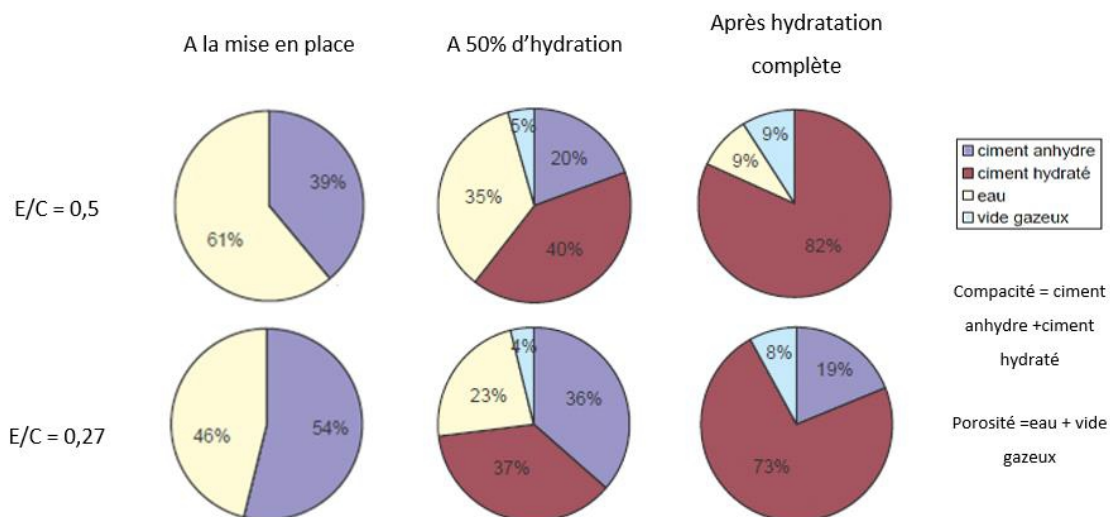


Figure I.3 : Evolution de la porosité d'une pâte de ciment en fonction du E/C [4]

2.1.4. Les adjuvants

Les adjuvants sont des composés organiques permettant de modifier et les améliorant certaines propriétés d'un béton correctement formulé, notamment la rhéologie du béton frais et la cinétique de prise et de durcissement.

Tableau I.3 : types des adjuvants [19]

Les adjuvants agissant sur la rhéologie du béton	
Les plastifiants	A teneur en eau égale, ils augmentent la maniabilité du béton
Les plastifiants réducteurs d'eau	A même maniabilité, ils augmentent les résistances mécaniques en permettant de diminuer la quantité d'eau
Les super plastifiants	Ils provoquent un fort accroissement de la maniabilité du mélange tout en autorisant une diminution importante de la quantité d'eau et donc en permettant une augmentation notable en résistance. Ils sont notamment utilisés dans la composition des Béton Hautes Performances et Béton Auto-Plaçant
Les adjuvants modifiant la prise et le durcissement	
Les accélérateurs de prise et de durcissement	Ils permettent de diminuer le temps de prise et de durcissement du ciment
Les retardateurs de prise	Ils augmentent le temps de prise du ciment. Ainsi ils sont utiles pour le transport du béton frais sur de

	longues distances.(attention à la cure) ¼ l'excès de dosage peut conduire à une inhibition de la réaction d'hydratation
Les adjuvants modifiant certaines propriétés du béton	
Les entraîneurs d'air	Ils entraînent la formation de microbulles d'air uniformément réparties [2]et améliorent la résistance au gel du béton durci (vases d'expansion) [6].
Les hydrofuges de masse	Ils diminuent la capacité d'absorption capillaire des bétons et mortiers durcis

2.2. Formulation du béton

Selon les propriétés que l'on attend du béton en matière de résistance (en fonction de son exposition), de sa rhéologie, et de sa prise (fonction des conditions atmosphériques), sa composition va être différente.

S'ajoute à cela le fait que les constituants utilisés dans la composition du béton ne sont pas les même partout et que pour un fournisseur donné, les caractéristiques des granulats et du ciment peuvent varier dans le temps.

Par conséquent, il n'existe pas une formulation unique du béton. Ainsi, plusieurs chercheurs ont développés des méthodes de composition des bétons : Bolomey, Abrams, Faury, Valette, Joisel, Dreux. Mais, pour cadrer la qualité du matériau, une norme de référence pour le béton et sa composition est en place, il s'agit de la norme européenne NF EN 206-1.

2.3. L'évolution de la résistance du béton

Le béton est un matériau qui a su devenir incontournable au cours du temps principalement grâce à sa grande résistance à la compression. C'est cette importante résistance qui nous permet aujourd'hui de construire des immeubles en béton et d'utiliser ce matériau pour résister à d'énormes contraintes.

D'une manière générale, il existe trois types de contraintes auxquelles peut être soumis votre béton, la compression (comme les poutres chargées par exemple), la traction (comme les suspentes) et la flexion (comme les poutres). Le type de contrainte à laquelle l'élément en béton armé sera soumis sera donc déterminant pour la résistance du béton à choisir.

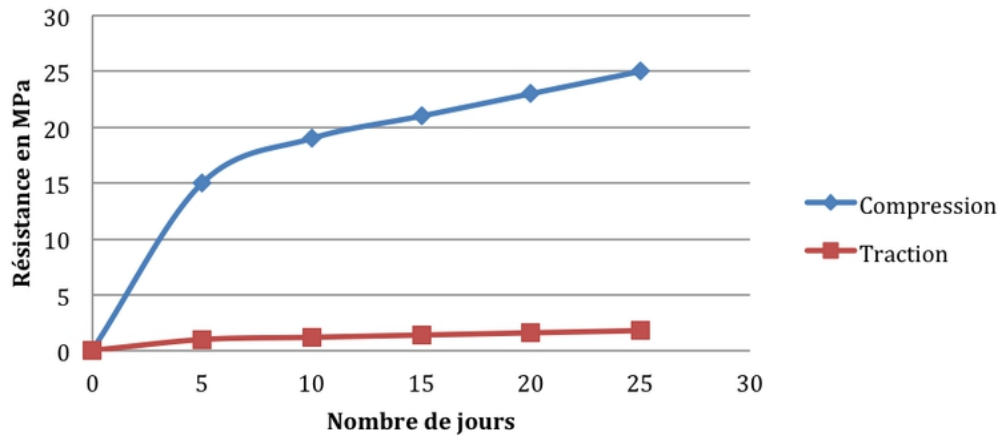


Figure I.4 : Evolution de la résistance du béton à la compression et à la traction

Le béton seul est un matériau naturellement résistant à la compression, d'autant plus s'il est armé, c'est donc sous ce type de charge qu'on essayera de le soumettre au maximum plutôt qu'à la traction. Concernant la traction n'est vraiment pas le domaine d'application favori du béton. S'il n'est pas armé, le béton peut être même cassant comme du verre lorsqu'il est soumis à de la traction. C'est une des raisons pour laquelle le béton armé a été développé. L'acier étant très résistant à la traction.

L'utilisation de béton seul pour résister à des efforts de traction est donc impossible, car les méthodes de calcul du BAEL ou même des Eurocode négligent complètement la résistance à la traction du béton pour des problèmes de sécurité. Il faudra donc faire bien attention lors de la conception de vos constructions à ce qu'un minimum d'éléments en béton (comme des suspentes) soit en traction et surtout à bien dimensionner les armatures en acier qui vont reprendre ces efforts.

Le B.A.E.L. considère que la résistance des bétons non traités thermiquement suit approximativement les lois suivantes [7] (fonction générale nécessitant une mesure plus précise pour les applications particulières).

- En compression à 20°C:

$$f_{cj} = \frac{j}{4,76 + 0,83 \cdot j} f_{c28} \quad \text{pour } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa}$$

$$f_{cj} = \frac{j}{1,40 + 0,95 \cdot j} f_{c28} \quad \text{pour } f_{c28} > 40 \text{ MPa}$$

- En traction à 20°C

$$f_{tj} = 0,6 + 0,06 \cdot f_{cj}$$

Ou :

f_{c28} : résistance à la compression à l'âge de 28 jours

f_{cj} : résistance à la compression à j jours

f_{tj} : résistance à la traction à j jours

La disposition des armatures est réfléchie de manière à reprendre les efforts de traction qui entraînent une fissuration dans l'élément en béton. Par conséquent, les armatures sont disposées de manière à traverser les fissures potentielles. Elles accompagnent la montée en traction et assurent le contact lorsque la limite de résistance du béton à la traction est atteinte (bien avant celle de l'acier), ce sont donc des armatures passives. Le Béton Armé est ainsi microfissuré par définition.

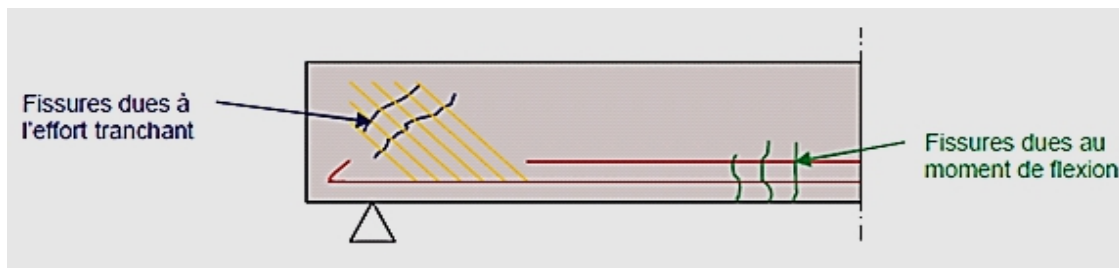


Figure I.5 : La disposition des armatures

Dans le cas du Béton Précontraint, les armatures sont dites actives car elles appliquent dès leur mise en tension une sollicitation antagoniste à la sollicitation agissante. Dans ce cas, on maintient le béton comprimé et on supprime les efforts de traction dans le béton. Il n'a donc plus tendance à fissurer.

2.4. L'intégration de la fissuration dans les règles de dimensionnement du béton armé

Le dimensionnement des ouvrages en B.A. respecte les règles du BAEL 91 corrigé 99. Dans cette réglementation, la fissuration du béton est intégrée au calcul [7].

Les formes et dimensions de chaque élément, ainsi que les dispositions des armatures, sont conçues de manière à limiter la probabilité d'apparition de fissures d'une largeur supérieure à celle qui serait tolérable en raison du rôle et de la situation de l'ouvrage [7].

Ainsi 3 types de fissuration sont définis. Le choix est fait en fonction de la destination de l'ouvrage. Selon le degré de préjudiciabilité de la fissuration pour la structure, la limite de la contrainte de traction prise pour effectuer les calculs de dimensionnement des armatures est différente [7].

- Fissuration non ou peu préjudiciable pour les ouvrages de formes simples, en milieu peu

agressif : la contrainte de traction des armatures est limitée à la valeur f_e , soit la limite d'élasticité des aciers utilisés.

- Fissuration préjudiciable pour les ouvrages en milieu moyennement agressif (bord de mer par exemple) : « la contrainte de traction des armatures est limitée à la valeur ξ (MPa) donnée par l'expression ».

$$\xi = \text{Min} \left\{ \frac{2}{3} f_e ; \text{Max}(0,5 \cdot f_e ; 110 \cdot \sqrt{n f_{tj}}) \right\}$$

- Fissuration très préjudiciable pour les ouvrages en milieu fortement agressif (plateforme offshore) ou pour lesquels aucune fissure n'est admise (réservoir ou centrale nucléaire) ; la contrainte de traction des armatures est limitée à la valeur $0,8 \xi$ (MPa).

3. LA FISSURATION DU BETON

La fissuration du béton peut être comparée à la rupture du maillon le plus faible d'une chaîne mise en tension. Elle peut avoir 3 origines possibles :

- La qualité du matériau ;
- La mise en œuvre ;
- Le fonctionnement de la structure.

3.1. La qualité du matériau

Dans ce paragraphe, seules les propriétés intrinsèques au béton pouvant aboutir à une fissure sont considérées. On qualifie la fissuration qui en résulte d'accidentelle.

3.1.1. Le ressuage

Le phénomène de ressuage correspond à l'apparition d'une pellicule d'eau claire à la surface libre horizontale du béton frais. Cette manifestation est liée à un tassement progressif du squelette sous la pesanteur et à une remontée concomitante de l'eau qui est ainsi chassée.

Le ressuage peut entraîner la formation de fissures au droit des obstacles s'opposant au mouvement de tassement du béton, comme la présence d'armatures, ou la variation locale de l'épaisseur de la pièce [4,5].

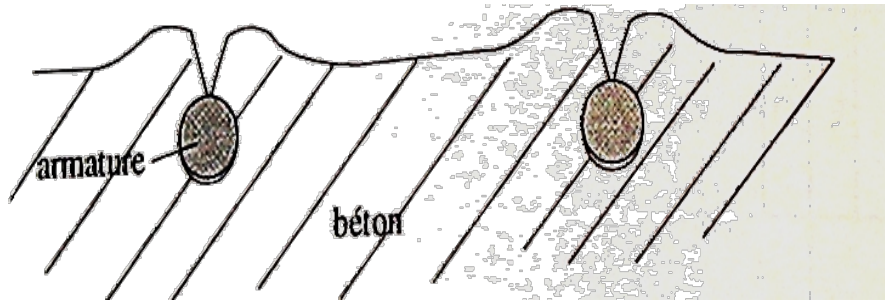


Figure I.6 : Tassement de béton bloqué par le lit supérieur d'armature

Pour prévenir ce phénomène, on peut jouer sur le dosage en eau et la dimension des granulats. Mais il faut surtout veiller à une composition granulométrique de qualité en particulier au niveau des sables.

3.1.2. Le retrait

Il existe plusieurs types de retrait qui interviennent à des moments différents dans la vie d'un béton et qui ont des causes différentes.

- Le « retrait plastique » est un phénomène exogène de dessiccation qui se produit avant et pendant la prise du béton. Ce retrait est piloté dans une large mesure par la vitesse de dessiccation qui dépend de la température de l'air, de la température du béton, de l'humidité relative et de la vitesse du vent. Il est associé au ressuage car il s'agit de l'évaporation de la pellicule d'eau résultant de ce phénomène [5].
- Le « premier retrait » est d'origine chimique et s'explique par la contraction de Le Chatelier, qui correspond à une déformation de la pâte de ciment observée au cours de l'hydratation, et attribuée au fait que le volume des hydrates formés est inférieur (de 8 à 10%) à la somme des volumes des constituants, ciment anhydre et eau, consommés dans la réaction.
- Le « retrait d'autodessiccation » ne concerne réellement que les bétons à hautes performances pour lesquels le rapport E/C est faible. Ce phénomène est liée à la formation des hydrates qui provoque une dessiccation sans départ d'eau à l'extérieur [5] et une mise en tension par effet de capillarité.
- Le « retrait hydraulique » (ou le « retrait de séchage ») intervient à plus long terme que les retraits précédents (dès le début de la montée en résistance et pendant plusieurs années). Il est lié au départ de l'eau libre du béton (excédent d'eau de gâchage nécessaire à l'ouvrabilité du béton mais n'entrant pas dans sa constitution) qui reste

dans les capillaires puis produit des tractions lors de son évaporation progressive dans le temps [4].

- Le « retrait thermique après prise » est lié aux réactions chimiques qui ont lieu lors de la prise. Ces réactions sont exothermiques et s'accompagnent donc d'un important dégagement de chaleur qui chauffe le béton, surtout dans les pièces massives. Après la prise, ce dégagement de chaleur ralentit et le béton se refroidit et se contracte mais sa rigidité a augmenté depuis sa montée en température par conséquent des mécanismes de fissuration peuvent être engendrés [4] la fissuration de peau et la fissuration en bloc [8].

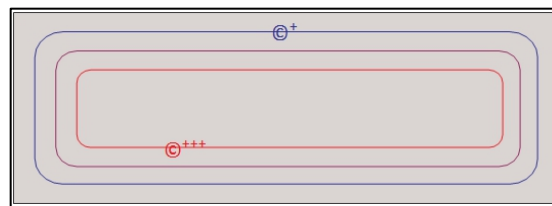


Figure I.7 : Principe de répartition des températures dans un élément en béton

3.2. La mise en œuvre

3.2.1. L'ajout d'eau

L'ajout d'eau à la livraison du béton est source de problème de fissuration. Certes il augmente l'ouvrabilité du béton ce qui facilite le travail, mais il a une incidence très néfaste sur la résistance du béton du fait qu'il augmente le rapport E/C. Par conséquent les capillaires sont plus nombreux ce qui diminue la résistance mécanique du béton et sa résistance aux agents agressifs.

3.2.2. Les conditions climatiques

Les conditions climatiques et surtout la température extérieure a une influence sur la prise et le durcissement du béton.

Avec le froid, les réactions d'hydratation du ciment sont ralenties, d'où une augmentation du temps de prise et de durcissement, le phénomène de prise allant jusqu'à s'arrêter complètement lorsque la température du béton descend en dessous de 0°C. Il convient alors de prendre des dispositions pour maintenir une cinétique d'hydratation suffisante pour mettre le béton hors gel, ce qui nécessite qu'il présente une résistance mécanique d'au moins 5 MPA lorsque le gel survient [6].

Un béton durci, même depuis plusieurs mois, peut être attaqué par une succession de cycles gel/dégel. Il est d'autant plus résistant qu'il est compact, homogène, avec un rapport E/C faible, composé de granulats non gélifs et qu'il contient de l'air entrainé (ou occlus).

Par temps chaud, l'évaporation de l'eau du béton et sa dessiccation sont favorisées. La prise et le durcissement sont donc accélérés sans que ses performances soient augmentées pour autant. Comme la chaleur accélère la prise du ciment, il faut en tenir compte pour la mise en œuvre qui devra être terminée avant le début de la prise [2]. Pour cela il est possible d'employer des retardateurs, mais leur utilisation est délicate. Enfin, l'évaporation a une grande influence sur le retrait avant la prise qui a lieu les premières heures de coulage et peut donc engendrer des fissures. C'est pourquoi la cure [2] du béton est importante dans ces conditions.

3.2.3. Les liaisons entre éléments de structures

- **Les reprises de bétonnage :** Les reprises de bétonnage sont des zones de faiblesse dans les structures en béton. Au contact du béton durci, le béton frais va développer un retrait bloqué qui favorise sa fissuration. De plus, les arrangements granulaires seront gênés par le béton durci et la zone de reprise sera plus riche en pâte, du côté du béton frais, qu'au sein du béton courant. Le retrait sera donc majoré.
- **La liaison entre béton armé et maçonnerie :** Les éléments de maçonnerie travaillent légèrement différemment par rapport au béton. En effet, leur résistance en traction est tellement faible qu'on peut la considérer comme nulle surtout au niveau du joint entre les parpaings. Les structures en maçonnerie sont associées à des éléments de structure en béton comme par exemple un linteau de fenêtre ou un plancher, et la liaison entre les deux éléments peut engendrer des fissures venant du fait que les 2 parties ne travaillent pas de la même façon.

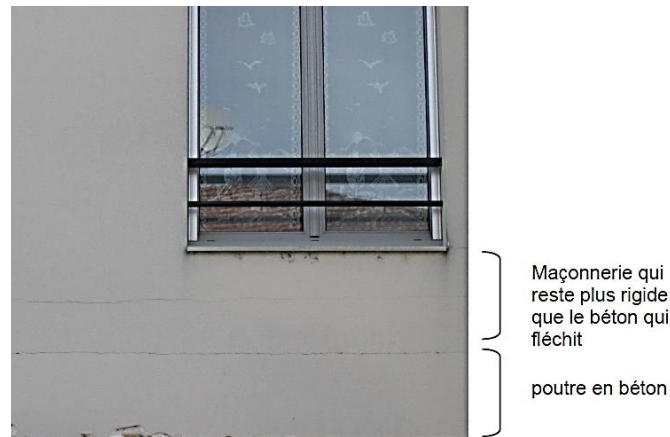


Figure I.8 : Fissuration liée à la liaison entre béton armé et maçonnerie

3.2.4. La mise en place des armatures

Il est nécessaire à l'exécution que toutes les armatures prévues par le bureau d'étude soient mises en place et disposées correctement selon le plan car pour certains éléments, une armature mal placée ne remplira pas son rôle et peut conduire à un dommage pour l'ouvrage. Prenons l'exemple du plancher d'un balcon qui est un élément en porte-à-faux. Si l'armature se situe dans la partie inférieure de l'épaisseur de la dalle, elle ne peut pas remplir son rôle, et cela peut conduire à la chute du balcon dans le pire des cas.

Sur le chantier, la gestion de la multiplication des lits d'armatures prévus par le bureau d'études, vis-à-vis de leur mise en place n'est pas évidente, voire parfois irréalisable. La question qui peut ainsi se poser est, le bureau d'études a-t-il dessiné la superposition des lits d'armatures qu'il a prévu pour voir si il était possible de les mettre en place en théorie tout en respectant les conditions d'enrobage? La question suivante étant, cette mise en place est-elle réalisable sur le chantier?

De plus, il est important de respecter l'enrobage des armatures défini dans le BAEL 91 révisé 99, à l'article A.7.1 car il contribue à protéger les armatures des agressions extérieures (exemple : la carbonatation des bétons) [4].

3.2.5. Les réseaux divers

La présence des réseaux (gaines électriques, plomberie,...) dans les éléments en béton peuvent causer des fissures car à leur niveau l'épaisseur du béton va être diminuée et par conséquent cela va générer une zone faiblesse.

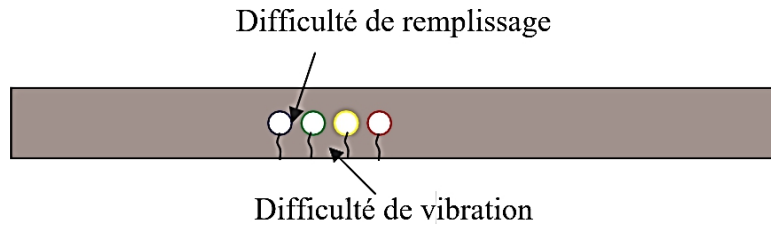


Figure I.9 : Fissuration liée à l'épaisseur du béton

3.2.6. La vibration

Vibrer le béton permet d'assurer le bon remplissage des coffrage et des moules, le serrage du béton et sa désaération en favorisant l'imbrication des granulats et en expulsant les bulles d'air. Cependant, il faut choisir le matériel adéquat à l'élément coulé et faire attention de ne pas mettre les armatures en vibration car cela peut entraîner des défauts de parements (fantôme d'armature) ou des fissures en accentuant le phénomène de ressuage vu précédemment [8].

3.3. Le fonctionnement de la structure

3.3.1. Le fonctionnement structurel mécanique

Lors de la conception et notamment dans le dimensionnement de la structure, des hypothèses sont prises quant au fonctionnement mécanique de l'ouvrage, à son environnement et aux charges qui lui sont appliquées. A la fin de la réalisation, lorsque l'ouvrage est soumis à ses descentes de charge réelles, on peut voir si la structure a un fonctionnement mécanique conforme au schéma de calcul ou non. Les fissures fonctionnelles d'un ouvrage en béton correctement dimensionné et mis en œuvre sont par nature compatibles avec un bon comportement c'est-à-dire qu'on peut les qualifier de « normales ». Ce caractère « normal » nous est donné par leur ouverture, car si cette dernière est supérieure à 0,3 mm, la fissure n'est plus considérée comme normale mais comme pathologique. Lorsque la fissuration n'est pas conforme au schéma de calcul, on peut conclure à une conception, une mise en œuvre ou un usage défectueux.

- **Le tassement d'appui (ou tassement différentiel) :** Le tassement d'appui génère des fissures dans un ouvrage. En effet, le tassement du sol entraîne un déplacement de la fondation. Ce tassement n'ayant pas lieu sous toutes les fondations (hétérogénéité du sol, fondations différentes, localisation des eaux souterraines, répartition des descentes de charges différentes de celles estimées...), il entraîne des déformations dans la

structure et par conséquent des contraintes supplémentaires notamment en traction, d'où l'apparition de fissures dont la caractéristique est leur orientation à 45°.

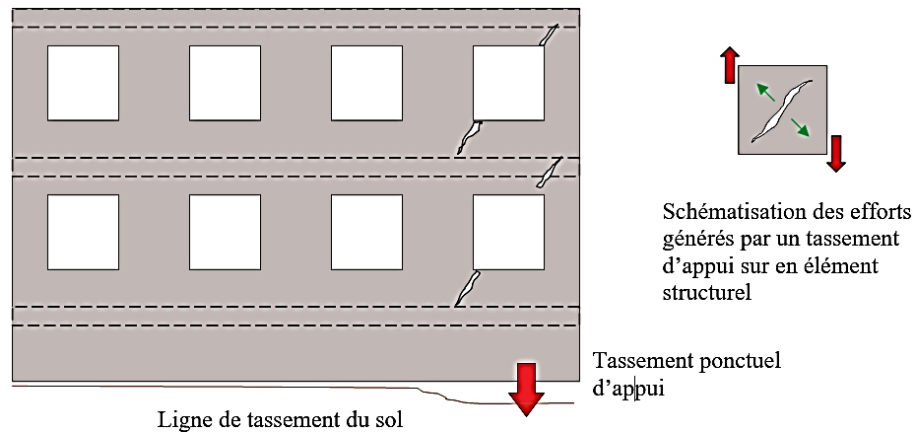


Figure I.10 : Fissuration liée au tassement d'appui

- **Le changement de destination de l'ouvrage pendant ou après la réalisation :** Selon l'utilisation future de l'ouvrage, des charges sont prises en compte pour le dimensionnement et des choix sont faits pour les matériaux. Si la destination de l'ouvrage est modifiée pendant sa réalisation ou après son achèvement, cela peut entraîner l'apparition de désordres.

Prenons l'exemple d'une façade qui doit accueillir un bardage. Au cours de la réalisation le maître d'œuvre décide de supprimer le bardage et de laisser les façades en béton apparent à l'heure où le gros œuvre est terminé. Cela peut entraîner des désordres dans les façades car le béton n'est plus protégé comme il devait l'être au départ et par conséquent son exposition n'est plus conforme à celle de départ qui a été prise en compte dans la formulation du béton.

- **La modélisation choisie non représentative du fonctionnement réel :** Les éléments les plus raides (de plus forte inertie ou de plus faible portée) reprennent alors des charges pouvant être beaucoup plus importantes que prévu. L'adaptation des structures se traduit par une fissuration dont l'un des effets est précisément de réduire l'inertie des éléments les plus raides.

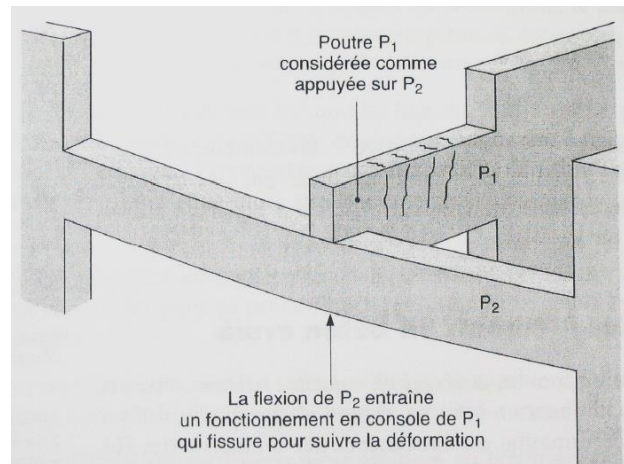


Figure I.11 : Fissuration liée à l'adaptation de fonctionnement des structures

3.3.2. Le fonctionnement structurel thermique

- **L'isolation thermique :** Du point de vue du fonctionnement thermique de la structure, l'isolation tient une part importante. En effet, la structure ne travaille pas de la même façon si l'isolant est situé à l'intérieur ou à l'extérieur.

Si l'isolation est intérieure, les façades de la structure travaillent à l'inverse des planchers. En été, il fait chaud à l'extérieur, donc on rafraichit l'intérieur du bâtiment ainsi les façades se dilatent et les planchers se rétractent. Cette différence de température entre les éléments verticaux et horizontaux entraîne des efforts supplémentaires au niveau de la liaison entre ces éléments et par conséquent la présence des fissures. Le bâtiment est comme « ceinturé » à la hauteur de chaque plancher. En hiver, les efforts sont inversés.

- **Le joint de dilatation et joint diapason :** L'acier et le béton ont le même coefficient de dilatation thermique, ce qui entraîne qu'il n'y a pas de contraintes internes entre le béton et l'acier sous cette contrainte. Ce coefficient de dilatation thermique est estimé à 10.10^{-6} . Par exemple, si on prend un élément en béton armé d'une longueur de 25 m, soumis à une différence de température de 30°C , la variation due à la dilatation est : $10.10^{-6} \times 25 \times 30 \times 1000 = 7,5 \text{ mm}$.

C'est pourquoi, il est important de prendre en compte les effets du retrait et de la dilatation sur les éléments et par conséquent, de « découper » la structure avec des joints de dilatation, pour réduire les désordres possibles. La distance maximale entre 2 joints successifs ou entre l'extrémité du bâtiment et le premier joint est à déterminer en fonction de la

conception générale du bâtiment (son architecture, si il y a plusieurs types de fondations) et des spécifications du règlement de construction en béton armé.

La réglementation préconise 25 m dans les régions sèches et à forte opposition de température et 50 m dans les régions humides et tempérées [7]. Cette disposition est importante pour limiter la fissuration ou éviter son amplification.

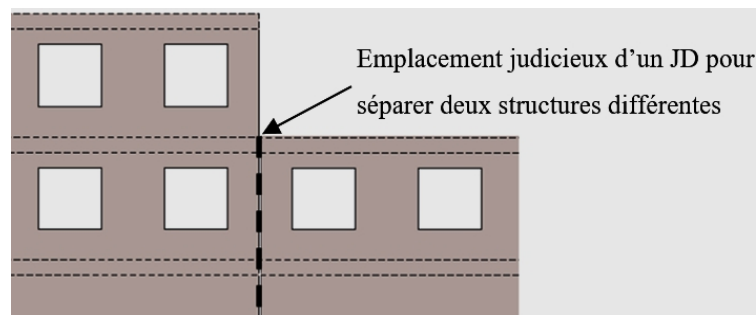


Figure I.12 :Le joint de dilatation

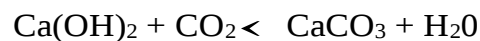
Pour les éléments soumis à de écarts de température plus forts que le reste de la structure (balcons, corniches, planchers-terrasse), des joints diapason sont prévus à cet égard.

3.4. Les facteurs chimiques

Ces éléments sont pas à l'origine d'une fissuration différente du béton survenant à moyen ou long terme. Ce sont des mécanismes qu'il faut prendre en compte vis-à-vis de la fissuration et des désordres qu'elle peut engendrer.

3.4.1. La carbonatation du béton [2,4,5]

La carbonatation des bétons est une lente évolution du béton sous l'effet du gaz carbonique de l'air CO_2 . Le dioxyde de carbone se dissout dans l'eau qui pénètre dans le béton par ses pores et réagit avec la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$.



Le carbonate de calcium CaCO_3 ainsi formé provoque du retrait de peau et fait chuter le pH du milieu de 13 à 8,5 environ, ce qui n'assure plus la protection des armatures vis-à-vis de la corrosion par la passivation. L'oxydation de l'acier s'amplifie alors et s'accompagne de la formation de sels gonflants qui poussent sur la peau du béton et causent des éclats.

La résistance propre du béton n'est pas affectée par la carbonatation, seule la corrosion

des armatures est en cause.

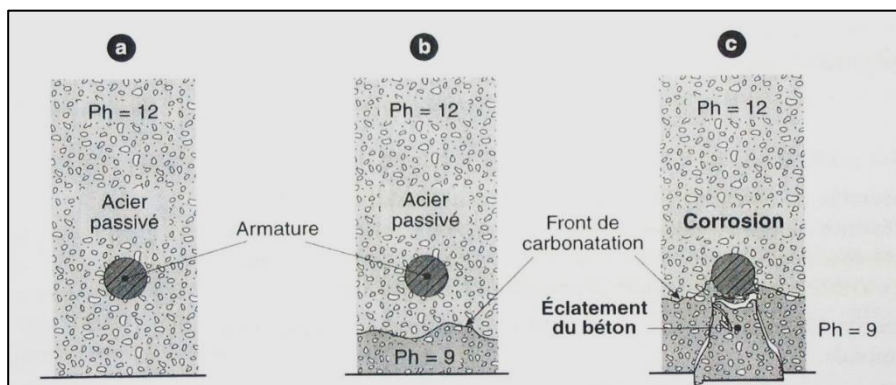


Figure I.13 : Evolution de la carbonatation

3.4.2. L'attaque par les chlorures [4,2]

Les chlorures s'introduisent dans le béton, soit par le biais de ses constituants au moment de sa confection, soit ultérieurement, s'il est exposé à une atmosphère maritime ou en présence de sels de déverglaçage ou de déneigement.

Les ions Cl^- peuvent atteindre les armatures et les attaquer en provoquant une corrosion électrochimique par piqûre du métal.

3.4.3. L'attaque sulfatique [4,2]

L'attaque sulfatique se produit en présence de gypse, d'eaux séléniteuses ou d'eau de mer et donne lieu à la cristallisation d'ettringite « secondaire » qui est expansive, d'où la fissuration et l'éclatement du béton par effet de coin.

La fissuration accentue la pénétration des sulfates et le front de la dégradation progresse et s'élargit avec le temps, jusqu'à la destruction plus ou moins complète du béton.

3.4.4. L'alcali-réaction [2,5]

L'alcali-réaction désigne un ensemble de réactions chimiques pouvant se produire avec certains types d'agréats réactifs. Ce phénomène peut conduire à un certain nombre de désordres dans les bétons : fissuration, expansion et baisse des performances mécaniques. Il ne se produit que si l'humidité relative dépasse 80 à 85%, en milieu fortement alcalin et en présence de granulats réactifs.

4. LA FISSURE ET LA PATHOLOGIE

4.1. Caractéristiques des fissures

Une fissure peut-être caractérisée par 4 éléments :

a- L'ouverture de la fissure

C'est la largeur entre lèvres qui peut être évaluée à l'œil nu et peut être mesurée avec précision à l'aide d'un fissuromètre [9].



Figure I.14 :Un fissuromètre

b- Le tracé de la fissure

C'est le développé de la fissure visible, sur toute la surface de la structure.

c- La profondeur de la fissure

Selon son caractère traversant ou non, la fissure peut être qualifiée de différentes façons [9] :

- **Fissure de surface** : fissure qui ne traverse pas l'épaisseur de la surface. L'ouverture dans ce cas est maximum en surface et nulle au sein du matériau.
- **Fissure traversant** : fissure visible au moins sur deux faces de la structure .
- **Fissure aveugle** : fissure traversant mais non accessible d'un ou plusieurs cotés de la structure.

d- L'activité de la fissure

- **Fissure passive ou morte** : fissure dont l'ouverture ne varie plus dans le temps quelques soient les conditions de température ou de sollicitation de l'ouvrage, car leur cause a disparu ou a devenu négligable.
- **Fissure active** : fissure qui varie dans le temps en fonction des gradients thermiques ou hygrométriques, des sollicitations de l'ouvrage ou des défauts d'exécution [9].

Selon ses caractéristiques, une fissure peut être classée en plusieurs types (Figure I.15) :

- ❖ **Les microfissures** : Ouvertures linéaires dont la largeur est inférieure à 0,2 mm. Dans le cas d'enduits à base de liants hydrauliques, elles peuvent se présenter sous forme d'un réseau. Les microfissures n'atteignent pas l'épaisseur de l'enduit et n'ont pas de conséquence sur le support lui-même. Elles enlaidissent la façade mais n'entraînent pas d'infiltration d'eau dans le mur [10].
- ❖ **Faïençage** : Réseau caractéristique d'ouvertures linéaires superficielles du fond, de très faible largeur qui n'intéresse, le plus souvent, que la couche superficielle du béton ou de l'enduit à base de liant hydraulique [10].
- ❖ **Fissure** : C'est une ouverture linéaire au tracé plus ou moins régulière dont la largeur est comprise entre 0.2 et 2 mm [10].
- ❖ **Lézardes-crevasses** : Fissure dont la largeur supérieure à 2mm et sont généralement provoquées par des mouvements de sol ou des sollicitations inhabituelles auxquelles ne résiste pas la structure du bâtiment [10]. La lézarde intéresse toute l'épaisseur de la paroi concernée : elle est donc infiltrant et qui permet à l'eau de la traverser [10].



Microfissures**Faïençage**

Figure I.15 : Types de fissures

4.2. Propagation de fissure

On peut distinguer quatre types de propagation de fissure [11] :

- **Type I :** une fissuration brutale provoquant une rupture fragile où la loi de comportement du matériau reste dans le domaine élastique linéaire.
- **Type II :** une fissuration brutale provoquant une rupture ductile où la loi de comportement du matériau est généralement élasto-plastique à grandes déformations.
- **Type III :** une fissuration successive fragile, la loi de comportement considérée est élastique linéaire, la vitesse de fissuration est lente (10^{-7} à 10^{-4} mm /cycle de chargement). Cette fissuration est constatée sous charge répétée.
- **Type IV :** une fissuration successive ductile, la loi de comportement considérée est élasto-plastique à petite déformation ; la vitesse de fissuration est relativement rapide. Cette fissuration est provoquée sous charge répétée.

Dans un milieu fissuré, trois zones successives sont à distinguer [11] :

- **La zone d'élaboration (zone1) :** elle se trouve à la pointe de la fissure et dans le sillage laissé par la fissure au cours de sa propagation.
- **La zone singulière (zone2) :** dans laquelle les champs de déplacement déformation et de contraintes sont continus et possèdent une formulation indépendante de la géométrie lointaine de la structure.
- **La zone 3 :** extérieure comprenant les champs lointains se raccordant d'une part, à la zone singulière et d'autre part aux limites en charge et en déplacement.

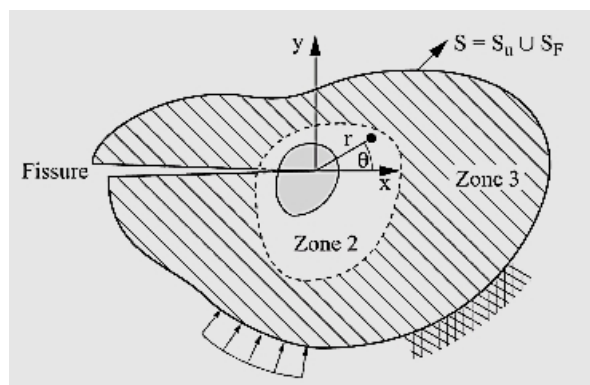


Figure I.16 : Zones délimitant le voisinage d'une pointe de fissure

5. MESURES DE LA PROPAGATION DE LA FISSURE

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles.

Une importante caractéristique des essais non destructifs est qu'ils peuvent être refaits au même endroit ou presque, ce qui permet de suivre les changements des propriétés du béton dans le temps.

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

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

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

Il existe deux types de méthodes pour l'estimation de la résistance de compression du béton. Les premiers, englobent les méthodes qui ne mesurent pas directement la résistance mais d'autres propriétés du béton, à partir desquelles, une estimation de la résistance peut être obtenue. Ces méthodes incluent les tests suivants :

- Essai au scléromètre ;
- Essai d'auscultation dynamique ;
- Méthodes combinées ;
- Méthode par carottage, ...etc.

Dans notre travail nous nous sommes intéressés seulement à l'essai d'auscultation dynamique.

5.1. Essai d'auscultation dynamique

5.1.1. Introduction

Cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée.

5.1.2. Principe

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

Les impulsions sont produites par des cristaux piézo-électriques à excitation par choc des cristaux semblables sont utilisées dans le récepteur JONS.R ET FACAOARU (1969).

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

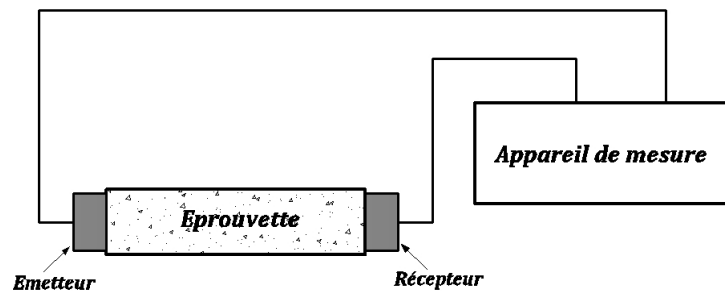


Figure I.17 : Appareil d'ultrason

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

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

A l'utilisation de la valeur de la vitesse de propagation d'une onde sonore pour déterminer la résistance du béton, il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique entre les deux selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).

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

1. Les ondes sonores se déplacent plus vite à travers un vide rempli d'eau qu'à travers un vide rempli d'air. Par conséquent les conditions d'humidité du béton influencent la vitesse des ondes sonores selon STURRUP, VECCHIO ET CARATIN (1984).
2. La surface sur laquelle l'essai est effectué doit épouser parfaitement la forme de l'appareil qui lui est appliqué, il est recommandé d'employer un matériau

intermédiaire entre le béton et les transducteurs. Les matériaux d'interposition sont la vaseline de commerce, un savon liquide ou une pâte constituée de Kaolin et de Glycérol. Lorsque la surface de béton est très rugueuse, il est nécessaire de poncer et d'égaliser la partie de la surface où le transducteur sera fixé.

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



Figure I.18 : Appareil d'auscultation sonore avec oscilloscope

5.1.3. Mode Opérateur

a- Travaux préparatoires

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

b- Étalonnage de l'appareil

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

c- Points de mesures

Le nombre de points de mesures dépend des dimensions de l'ouvrage à tester. Pour un grand panneau (dalle, voile, radier, etc.) les points de mesures sont situés aux intersections d'un quadrillage d'une maille de 0.5m. Le cas des petits éléments (poteaux, poutres, etc.), les mesures se font en six points. Une distance minimale de parcours de 400 mm pour les mesures en surface est recommandée.

d- Manières de mesure

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

- **Mesure en transparence (directe) :** Les mesures en transparence sont utilisées dans le cas des éprouvettes, des poteaux ou de certaines poutres. Les transducteurs sont appliqués sur les deux faces de l'élément à tester. (Figure I.19)
- **Mesures en surface (indirecte) :** Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les dalles et éléments en longueur (figure I.19). 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.
- **Mesures semi directe :** Elles sont utilisées sur tous les éléments de structure et sur les éprouvettes, mais plus particulièrement sur les éléments de structure ou on ne peut pas utiliser les deux autres manières. (Figure I.19)

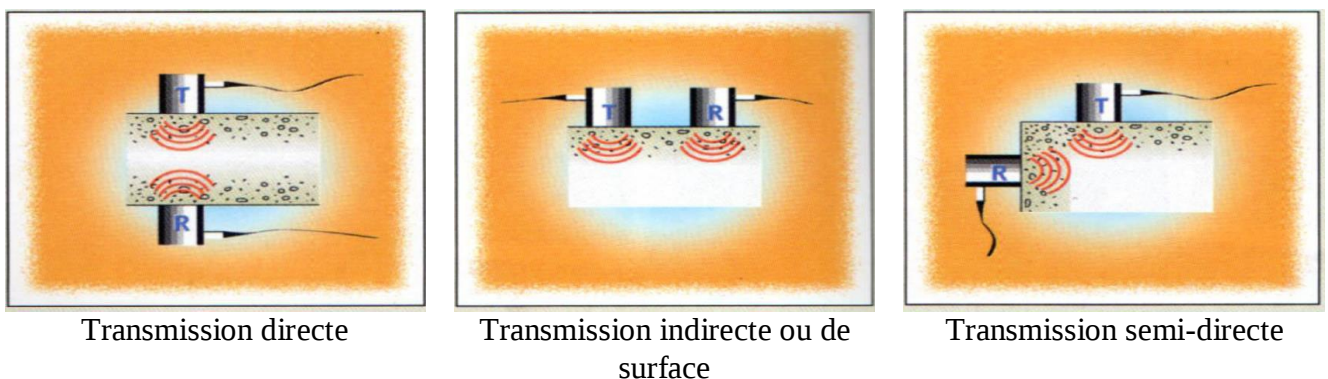


Figure I.19: Manières de mesure de la vitesse de propagation des ultrasons

5.1.4. Paramètres influents la vitesse des ultrasons

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

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

Les résistances des autres bétons qui diffèrent du béton standard pour lequel une courbe de calibrage a été établie, doivent être corrigés en affectant la résistance du béton de référence par des coefficients partiels d'influence correspondants.

- ✓ Exemple de tracés de courbes de calibrage

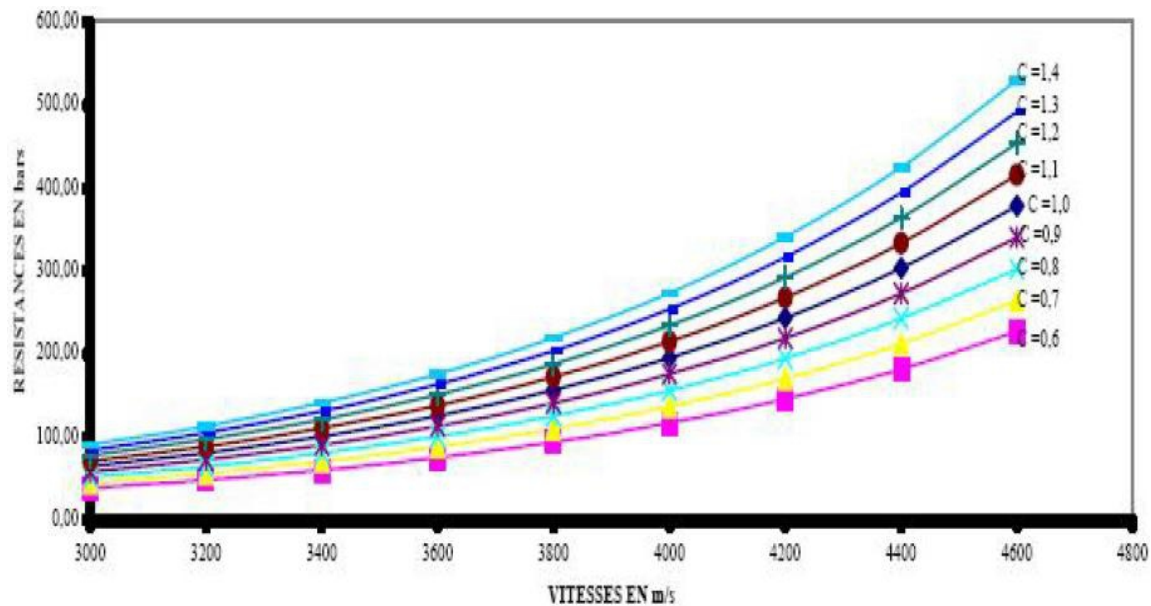


Figure I.20 : Courbes de calibrages

Excepté le cas on l'on dispose de courbes de calibrage telles que rappelées ci avant, des cas peuvent se présenter tels que :

- Composition du béton connue, absence d'éprouvettes ou de carottes,
- Composition du béton connue et existence d'un petit nombre d'éprouvettes ou de carottes,
- Méconnaissance de la composition du béton et existence d'éprouvettes ou de carottes,
- Méconnaissance de la composition du béton et inexistence d'éprouvettes et de carottes.

La détermination de la résistance du béton in situ sera étudiée au cas par cas.

5.1.5. Les avantages de l'essai aux ultrasons

- ❖ C'est une méthode idéale pour déterminer l'homogénéité du béton.
- ❖ L'essai peut être utilisée autant sur les ouvrages complétés que sur ceux en construction.
- ❖ La mesure des ondes sonores présente l'énorme avantage de donner des informations sur l'intérieur d'un élément de béton. Et selon CHUNG ET LAW (1983) l'essai de propagation des ultrasons peut être utilisé pour détecter la fissuration (les fissures parallèles au déplacement de l'onde), les vides détériorations dues au gel ou de feu et l'uniformité du béton dans des éléments semblables. L'essai de propagation des

ultrasons peut être utilisé pour suivre les changements microstructuraux dans un élément par exemple à la suite de cycles répétés de gel dégel.

- ❖ ELVERY ET IBRAHIM (1976) et pendant leurs études sur la relation de la vitesse et la résistance dans plusieurs âges ont montrés que l'essai peut aussi être utilisé pour évaluer la résistance du béton à très jeune âge, à partir de trois heures et plus, ce qui peut être intéressant dans le domaine de la préfabrication du béton ou comme outil de décision pour déterminer le moment adéquat des opérations de décoffrage.

5.1.6. Interprétation des résultats de mesure aux ultrasons

Dans un milieu homogène et isotrope, la vitesse des ondes longitudinales des ultrasons est reliée au module d'élasticité et à la masse volumique. Cette relation donne une base logique pour utiliser des mesures de vitesse des ondes pour estimer la résistance à la compression du béton. Mais il faut mentionner qu'il n'y a pas de relation physique unique entre les deux paramètres compte tenu de l'influence des différents constituants entrant dans la composition du béton. Par conséquent une corrélation plus fiable entre la vitesse de propagation des ultrasons et la résistance du béton à la compression ne peut être établie que dans des limites strictes données ci-après figure I.22.

5.1.6.1. Corrélation entre la vitesse de propagation du son et les propriétés mécaniques du béton

a. Corrélation entre la vitesse de propagation du son et la résistance du béton

La corrélation graphique entre de la vitesse de propagation V et la résistance à la compression R doit être établie au préalable pour un projet donné, sur la base du béton formulé pour le chantier.

Les résultats obtenus en appliquant la courbe de la RILEM (voir figure I.21) sont donnés dans le cas où le béton testé est considéré connue. Les résistances ne correspondent pas toujours à la résistance réelle du béton in situ. C'est pour cette raison que par exemple dans les procès-verbaux du CNERIB, seuls les appréciations suivantes sont données :

- Classements qualitatifs :
 - $2500 \text{ m/s} \leq V < 3200 \text{ m/s}$ béton de faible résistance,
 - $3200 \text{ m/s} \leq V < 3700 \text{ m/s}$ béton de moyenne résistance,
 - $3700 \text{ m/s} \leq V < 4200 \text{ m/s}$ béton à haute résistance,

- $V \geq 4200$ m/s béton à très haute résistance.

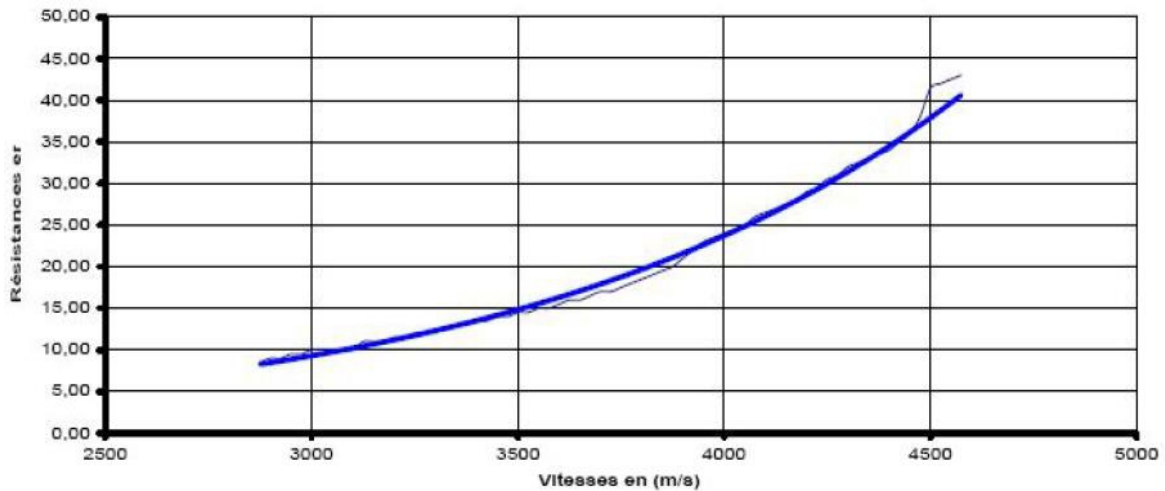


Figure I.21: Courbe RILEM [12]

D'autres travaux réalisés par BOUKHELKHAL Djamila, KENAI Saïd [12], ont essayé de trouver une relation entre les essais non destructifs (Scléromètre & Ultrason) sur le béton in situ et sa résistance. La figure I.22, présente la courbe de corrélation établie entre les résistances à la compression par écrasement « R_c » et les vitesses ultrasoniques « V » correspondants.

Ils ont proposée à cette corrélation est une relation de forme exponentielle avec un coefficient de corrélation $r = 0,926$ et une erreur type $s = 4,063$ MPa.

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

Avec R en MPa et V en km/s.

D'après la figure I.21, ils ont conclu qu'il existe une bonne corrélation entre les résistances à la compression par écrasement et les vitesses ultrasoniques correspondantes pour l'ensemble des différents bétons examinés.

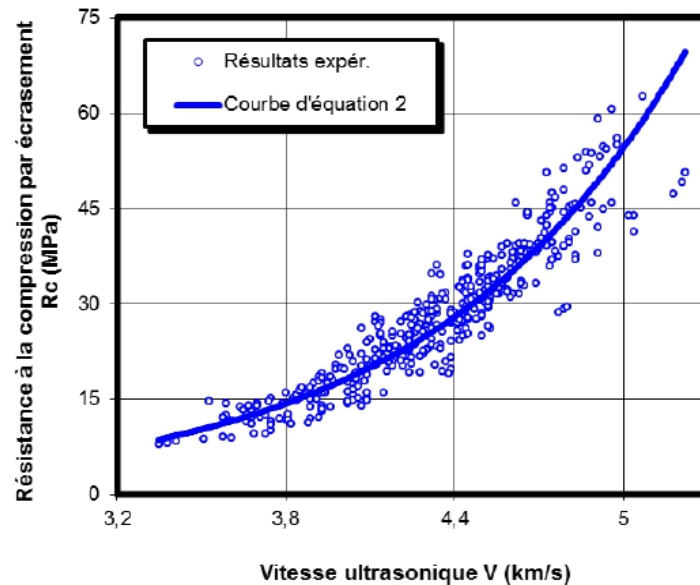


Figure I.22 : Corrélation Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique [12]

b. Corrélation entre la vitesse de propagation du son et le module d'élasticité

Pour estimer le module d'élasticité d'un ouvrage âgé en service, les mesures par ultrasons sont recommandées. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans un béton dépend du module d'élasticité du béton et de sa densité.

GADRI et GUETTALA [12], sur la base des travaux de Hassan Münzer (1994) [13], ont essayé de déterminer le module d'élasticité statique et dynamique selon la vitesse du son et la masse volumique.

Les valeurs de module d'élasticité statique et dynamique calculées en fonction de la vitesse du son et comparé par rapport les valeurs estimées selon le BAEL, sont présentées dans la figure I.23. Ils ont remarqués qu'il y a une différence importante entre les valeurs de module d'élasticité calculées en fonction de la vitesse du son et celles obtenus par le BAEL

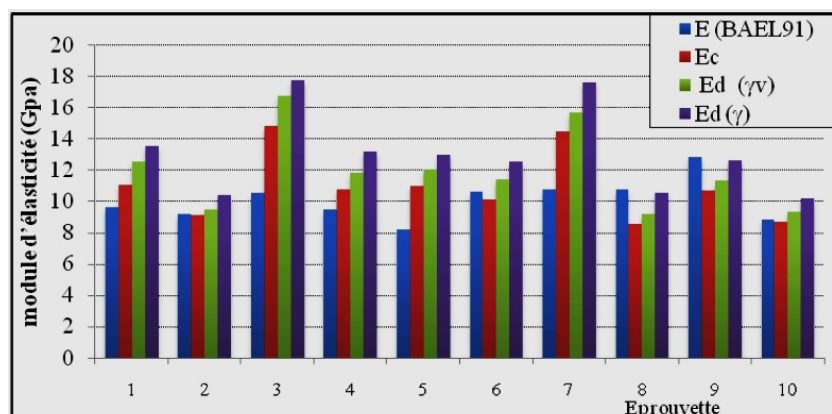


Figure I.23 : Comparaison de différentes valeurs de module d'élasticité [13]

6. CONCLUSION

L'objectif de ce chapitre est de faire la synthèse des connaissances existantes sur le béton et de sa fissuration.

En génie civil, l'étude des fissures se propageant dans le matériau est nécessaire et basée sur la mécanique de la rupture. Cette théorie est devenue opérationnelle pour les matériaux métalliques comme pour les matériaux cimentaires.

Plusieurs auteurs ont essayé depuis longtemps, de caractériser avec précision les champs mécaniques en pointe de fissure et de modéliser numériquement la propagation de telles fissures.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du béton et dans le développement ultérieur de la technologie de construction. La signification de ces essais se développera considérablement à l'avenir, parce que sa technologie de mesure automatisée et la réduction de la taille de l'appareillage de mesure ouvriront des applications entièrement nouvelles. Les essais non destructifs sur le béton, comme l'auscultation dynamique, sont très utiles pour évaluer la résistance du béton et son module d'élasticité.

CHAPITRE II



Caractérisation des Matériaux et Procédures d'essai

1. INTRODUCTION

La connaissance de diverses propriétés : physiques, chimiques et mécaniques des matériaux, est une exigence primordiale dans toute opération de construction ou de réparation, dont le but tout d'abord l'emploi judicieux de ces matériaux, ensuite pour faire un choix répondant à leur destination, et en fin pour que ces matériaux soient malaxés d'une façon correcte afin de produire un mélange homogène à grande échelle et possédant par conséquent des propriétés uniformes.

Nous connaissons que la vitesse des ondes ultrasoniques à travers le béton résulte du temps mis par les ondes pour traverser la pâte de ciment durci et les granulats. Cette vitesse dépend énormément de certains facteurs à savoir : le type de ciment, le dosage en ciment, le rapport E/C, la nature des granulats, la granulométrie, l'humidité du béton ; la maturité du béton et les adjuvants.

A cet effet, dans ce chapitre après présentation des matériaux utilisés, et les essais de leur caractérisation. On a entamé la formulation et la confection des mortiers étudiés. Par la suite, on a présenté les différents essais destructifs à savoir les essais de compression simple et les essais flexion, afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de nos mortiers, et les essais non destructifs à savoir l'essai d'auscultation dynamique ou ultrasonique, dans le but d'étudier la propagation des fissures au niveau de nos mortiers.

2. CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

2.1. Présentation des matériaux utilisés

2.1.1 Les sables

Dans cette étude on a utilisé trois types de sable proviennent de la région de Laghouat :

- **Le sable alluvionnaire**, issu de la carrière d'Oued M'zi située au nord de la commune de Laghouat près du pont. En effet, ce sable est généralement utilisé dans la composition des bétons dans tous les projets de construction de la région.

- **Le sable calcaire**, issu des résidus de la station de concassage des roches calcaires située au nord de la commune de Laghouat. En effet, dans cette station, la fraction des granulats dont le diamètre est supérieur à 3 mm est commercialisée ; le reste est rejeté dans la nature.
- **Le sable dunaire**, la région de Laghouat est considérée comme une région saharienne située à 400 km au sud de la capitale. La zone de provenance du sable de dune est située dans les environs de la ville de Laghouat (Oasis nord).



Figure II.1 : Types de sables utilisés

a. Caractéristiques physiques

Il est nécessaire de connaître les caractéristiques physiques des constituants d'un béton avant de faire l'étude de la composition théorique de ce dernier.

Pour cela, on présentera les caractéristiques essentielles des matériaux utilisés :

Afin de définir les caractéristiques des composants du béton, nous avons réalisé les essais suivants :

- Masses volumiques absolue et apparente, compacité et porosité ;
- Analyse granulométrique ;
- Module de finesse ;
- Equivalent de sable ;
- Absorption d'eau ;

- **Masse volumique apparente et absolue**

- La masse volumique apparente est la masse de l'unité de volume du matériau à l'état naturel. Elle est mesurée selon la norme NFP 18-555 comme suit :

$$\rho = \frac{M_1 - M_2}{V_{ap}}$$

M_1 : Masse totale (matériaux + récipient)

M_2 : Masse de récipient vide

V_{ap} : Volume de récipient égale à 1 litre

- La masse volumique absolue est mesurée selon la norme NFP 18-555 par la relation suivante :

$$\rho_s = \frac{M}{V_2 - V_1}$$

M : Masse des granulats

V_1 : Volume d'eau

V_2 : Volume totale (eau + granulats).

Les résultats de l'essai sont donnés au tableau II.2.



Figure II.2 : Essai de la masse volumique apparente



Figure II.3 : Essai de la masse volumique absolue

- La compacité : est le rapport entre masse volumique apparente et masse volumique absolue :

$$C_p = \frac{\rho}{\rho_s}$$

ρ_s : Masse volumique absolue

ρ : Masse volumique apparente

- La porosité : est le complément à l'unité de la compacité. Il est défini par la relation suivante :

$$p = 1 - C_p$$

- **Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique est réalisée selon la norme NFP 18-560, elle permet de déterminer les différents diamètres de grains et leurs proportions qui constituent un granulat.

Pour cela, l'analyse consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, les grains ainsi isolé peuvent être pesé pour déterminer la proportion de chacun dans le granulat. La représentation graphique de cette analyse permet d'analyser facilement ces informations.

L'échantillon représentatif doit avoir une masse comprise entre 200D et 600D, où D est la plus grande dimension des granulats analysés.



Figure II.4 : Essai d'analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique effectuée sur les différents sables utilisés sont présentés sur figure II.5. Nous remarquons que les trois sables sont de hors du fuseau du sable normalisé. Nous signalons que pour le sable calcaire la courbe est tracée après élimination des fines, afin de ne pas perturber les propriétés rhéologique et mécanique du mortier élaboré à base de ce sable.

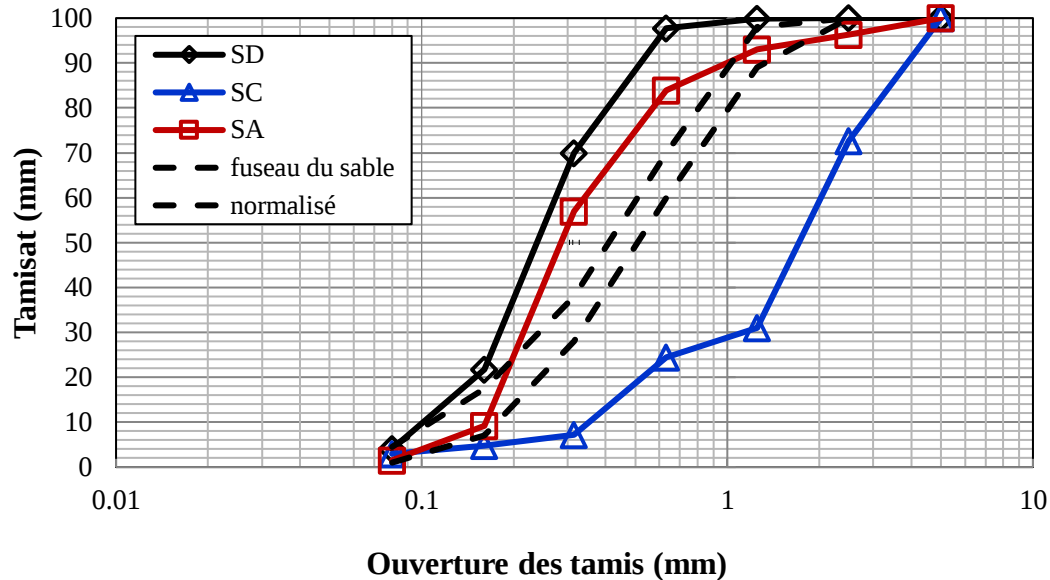


Figure II.5 : Courbes granulométriques des sables d'étudiés

- **Module de finesse**

Avec la norme Française [NFP 18-540], le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulés des tamis}(0.16 - 0.315 - 0.63 - 1.25 - 2.5 - 5)}{100}$$

- **Equivalent de sable**

Cet essai est utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables utilisés pour la composition du béton. L'essai est réalisé selon la norme NF P 18-598. L'équivalent de sable peut être mesuré visuellement et par piston :

$$ES_V = \left(\frac{h'_2}{h_1} \right) 100 \qquad ES_P = \left(\frac{h_2}{h_1} \right) 100$$

h_1 : sable propre + élément fins.

h_2 et h'_2 : les hauteur du sable propre seulement (visuel et piston respectivement).

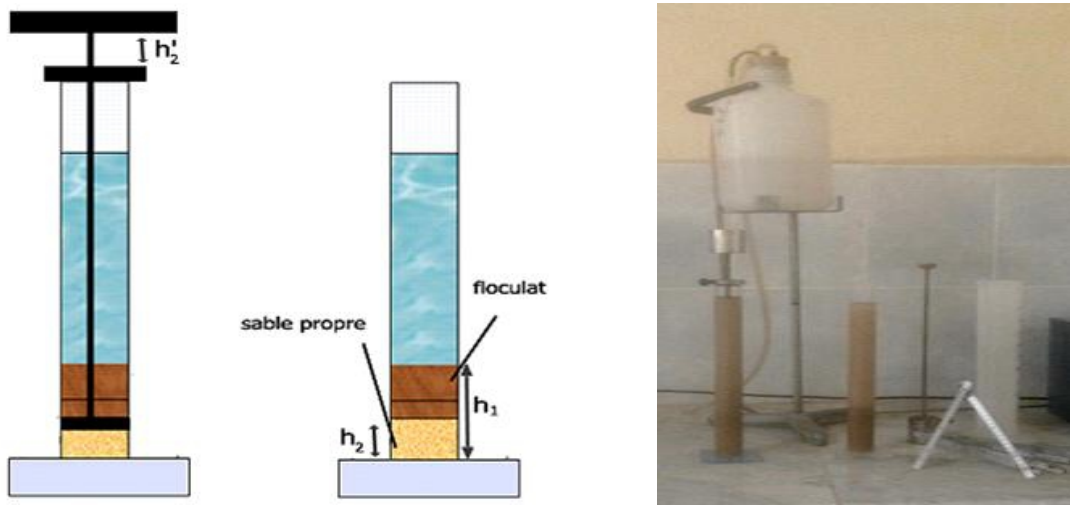


Figure II.6 : Essai d'équivalent de sable

Les résultats de l'essai sont donnés au tableau II.2.

Tableau II.1 : Valeur préconisées pour l'équivalent de sable[15]

ES visuel	ES piston	Nature et qualité de sable
$ES_v < 65$	$ES_p < 60$	Sable argileux
$65 \leq ES_v \leq 75$	$60 \leq ES_p \leq 70$	Sable légèrement argileux
$75 \leq ES_v \leq 85$	$70 \leq ES_p \leq 80$	Sable propre
$ES_v \geq 85$	$ES_p \geq 80$	Sable très propre

- Absorption d'eau**

Le coefficient d'absorption est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après immersion dans l'eau pendant 24 heures à 22° C à la masse sèche de l'échantillon conformément à la norme NF P 18-555.

Le coefficient d'absorption d'eau est défini par la relation suivante :

$$Ab = \frac{M_a - M_s}{M_s} \times 100$$

M_s : Masse de sable sec après passage à l'étuve à 105° C.

M_a : Masse de sable imbibé.

Les résultats de cet essai sur les sables utilisés sont donnés au tableau II.2.



Figure II.7 : Essai d'absorption d'eau

Les caractéristiques physiques des sables d'étude sont représentées dans le tableau II.2

Tableau II.2 : Les caractéristiques des sables étudiés

Caractéristiques	Unité	SD	SA	SC
La masse volumique apparente ρ	kg /m ³	1514.46	1551.68	1425.03
La masse volumique absolue ρ_s	kg /m ³	2500	2548	2620
La compacité Cp	%	60.57	60.89	54.39
La porosité P	%	39.43	39.11	45.61
Coefficient d'uniformité Cu	-	2.737	2.130	5.26
Coefficient de courbure Cc	-	1.180	0.837	1.31
Le module de finesse M_f	-	1.10	1.60	3.72
Classification		Sable fin	Sable fin	Sable grossier
Equivalent de sable E_{sv}	%	76.37	81.3	87.51
Equivalent de sable E_{sp}	%	81.98	92.24	94.235
Coefficient d'absorption Abs	%	0.85	1.2	2.4

D'après les résultats de ces essais de caractérisation, réalisés sur les trois sables, récapitulés dans le tableau II.2, on peut conclure que les trois sables étudiés présentent des

courbes granulaires légèrement étalés avec des diamètres maximales différents de 5mm pour les deux sable SA et SC et de 1,25mm pour le sable SD. La fraction fine pour les trois sables est négligeable. Selon les valeurs du module de finesse, les deux sable SD et SA sont classés comme des sables fins, tandis que le SC est un sable grossier. Les résultats de l'essai de l'équivalent de sable montrent que les trois sont propres. Concernant l'essai d'absorption, les résultats ont permis de conclure que le SC présente un coefficient d'absorption le plus grand de l'ordre de 2,4 tandis que le SD présente un coefficient d'absorption le plus faible de l'ordre de 0,85.

2.1.2 Le ciment

Le ciment utilisé pour la confection des trois mortiers est conforme à la norme algérienne NA 442, dont la dénomination est CPJ - CEM II/B-L 42,5 N, fabriqué par la cimenterie (ELMATIN).

a. Caractéristiques chimiques

La composition chimique du ciment utilisé a révélé l'existence des éléments qui sont présentés en pourcentage massique dans le tableau suivant :

Tableau II.3: Composition chimique du ciment

	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Ca O	Mg O	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	PAF
Ciment	18.88	4.36	3.10	62.23	1.43	2.70	0.28	0.58	6.50

b. Caractéristiques mécaniques

Le tableau suivant résume certaines caractéristiques mécaniques de ciment utilisé.

Tableau II.4: Caractéristiques physiques et mécaniques de ciment utilisé

Propriétés physiques et mécaniques	CPJ-CEM II /B-L
Début de prise heure/min	2,45
Fin de prise heure/min	3,50
Rc28 (MPa)	≥42.5
Rt28 (MPa)	4,3

2.1.3. L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée pour la totalité de nos essais de formulation de béton de sable, est une eau potable du robinet de laboratoire de recherche de génie civil (LRGC) de l'université Amar Telidji de Laghouat.

3. FORMULATIONS ET CONFECTION DES MORTIERS

Dans notre étude on a essayé de formuler trois mortiers à base de trois sables différents, dont l'objectif de voir l'influence de la nature et de type de sable sur la vitesse de propagation des fissures.

3.1 Essai d'écoulement au maniabilimètre B

Cet essai consiste à mesurer le temps d'écoulement nécessaire à un volume de mortier soumis à des vibrations pour atteindre un repère donné. Une partie de la cuve étant remplie avec du mortier, le soulèvement paroi mobile permet de déclencher la mise en vibration de l'ensemble de l'appareil (selon la norme NFP 18-452).

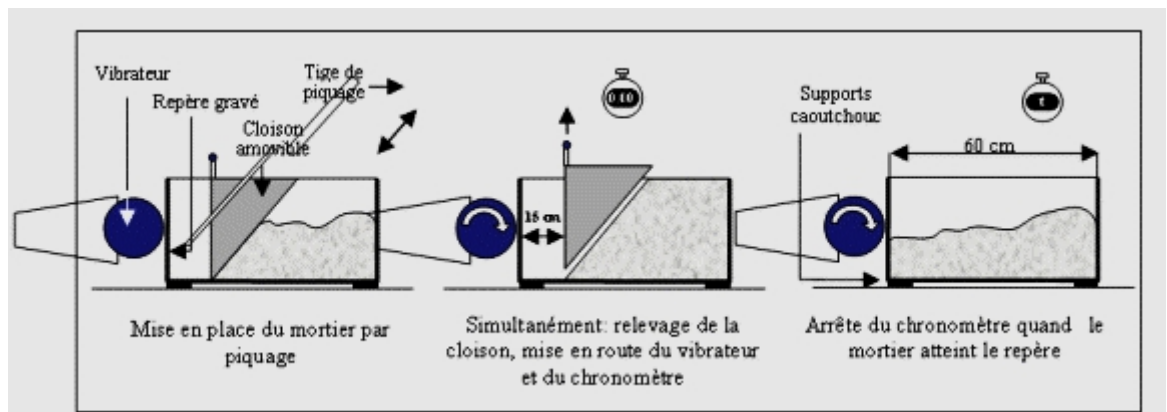


Figure II.8 : Schéma des étapes de l'essai d'écoulement au maniabilimètre B

Tableau II.5 : Classification de consistance [17]

Classe de consistance	Duré (en s)
Ferme	$t \geq 100$
Peu plastique	$75 < t \leq 100$
Plastique	$50 < t \leq 75$
Très plastique	$30 < t \leq 50$
Fluide	$10 < t \leq 30$
Très fluide	$t \leq 10$

Les résultats obtenus au niveau de laboratoire sont présentés sur le tableau II.6 :

Tableau II.6 : Résultats de l'essai de maniabilité

Nature de béton	E/C	Duré (S)	Observation
Mortier de sable de dune (MSD)	0,52	10,6	Fluide
Mortier de sable alluvionnaire (MSA)	0,48	10,2	Fluide
Mortier de sable calcaire (MSC)	0,47	11,4	Fluide

D'après ces résultats, la consistance des trois mortiers est fluide. Nous remarquons que le mortier MSC a un temps d'écoulement élevé par rapport aux autres mortiers MSD et MSA. Cela, est peut être dû à la présence de certains pourcentages des fines dans le sable calcaire.

3.2 Formulation des mortiers de sable étudiés

Après une série d'essais nous avons opté pour une formulation finale du mortier ; Sur la base du mortier normalisé (1/3 ciment et 2/3 sable) ; La composition optimale des mortiers étudiés est donnée au tableau II.7.

Tableau II.7 : Composition des mortiers étudiés

Nature de sable	dosages en constituants (kg/m^3)			
	Ciment	Eau	Sable	E/C
Mortier de sable de dune (MSD)	600	312	1200	0.52
Mortier de sable alluvionnaire (MSA)	600	288	1200	0.48
Mortier de sable calcaire (MSC)	600	282	1200	0.47

3.3. Confection des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées dans notre étude sont des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ destinées aux essais de traction par flexion.

Ces éprouvettes sont composées d'une base et des parois verticales métalliques fixés par boulons, ils sont imperméables et rigides et leur intérieur est huilé avant la mise en place du mortier.



Figure II.9 : Eprouvettes prismatiques utilisées

Après le dosage, la préparation des épreuves est réalisée selon la norme NF P 18-400.

Le malaxage est réalisé à l'aide d'un malaxeur normalisé pour mortier normale dont la durée de malaxage totale est de 5 minutes. Le mortier est prêt à l'emploi, il est introduit dans des épreuves déjà graissés par une huile pour faciliter le démoulage après 24 heures de conservation au laboratoire à une température de 25 °C et d'une humidité de 65%, La vibration a été réalisée sur une table vibrante à amplitude de vibration réglable. La durée de vibration est 30 + 30 secondes.



Figure II.10 : Confection des épreuves

3.4. Conservation des épreuves

Les épreuves sont préparées aux laboratoires de génie civil de l'université de Laghouat dans une température de $T = 20 \pm 5^\circ\text{C}$ et l'humidité relative est d'environ 80%. Elles sont couverts de film en plastique et stockés dans l'environnement de laboratoire jusqu'à la date des essais.



Figure II.11 : Conservation des éprouvettes

4. ESSAIS SUR LES MORTIERS DURCIS

Le but de cette étude est d'évaluer expérimentalement l'influence de la fissuration du matériau et de son état de dégradation vis-à-vis du processus des charges.

Le programme expérimental se compose comme suit :

- Confection des éprouvettes avec différents mortiers ;
- Rupture des éprouvettes : la résistance mécanique du matériau (essai de flexion) et étude de l'évolution de la fissure.

Les essais destructifs et non destructifs ont été effectués sur les éprouvettes à l'âge de 3, 7, 21, 14 et 28 jours. Au début de chaque essai, les éprouvettes ont été pesées à l'aide d'une balance de 5 g de précision.

4.1. Essais destructifs

Pour déterminer les performances mécaniques de nos mélanges, on a procédé des essais de traction par flexion et compression.

4.1.1. Essais de résistance à la traction par flexion à trois points

Cet essai permet de contrôler la qualité du mortier de notre étude, il donne une indication sur la résistance à la traction par flexion du mortier utilisé et donc sur sa résistance à la fissuration.

L'essai a été effectué selon la norme NF P 18 – 407 qui précise les détails de cet essai. Les éprouvettes sont testées après une cure de 3, 7, 21, 14 et 28 jours. On a pris la moyenne de trois éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³ pour chaque type de mortier utilisé.

Les éprouvettes reposant sur deux appuis, une charge concentrée unique appliquée au milieu de l'éprouvette (moment maximal au centre). La charge étant placée au centre du prisme.

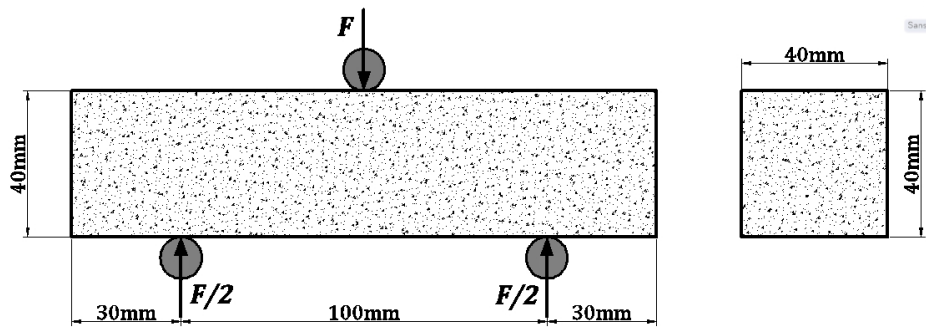


Figure II.12 :Dispositif pour l'essai de flexion en trois points

Les éprouvettes sont poussées progressivement à travers plusieurs cycles jusqu'à la rupture la contrainte de traction par flexion (3 points) est calculée selon la formule suivante :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2B^3}$$

σ_f : Résistance à la flexion du béton (MPa) ;

F : Charge maximale enregistrée à la rupture (N) ;

L : Distance entre les deux appuis (mm) ;

B : Coté de la section transversale de l'éprouvette (mm).



Figure II.13 : Eprouvettes après essai de flexion en trois points

4.1.2. Résistance à la compression

L'essai a été effectué selon la norme NFP 18-406, Les éprouvettes étudiées sont, les deux parties de gauche et de droite de l'essai de flexion, soumises à une charge croissante jusqu'à la rupture par l'appareil de compression.

La résistance à la compression est le rapport entre la charge de rupture et la section transversale de l'éprouvette. Les demi-prismes d'éprouvettes obtenues après la rupture en flexion seront rompus en compression.

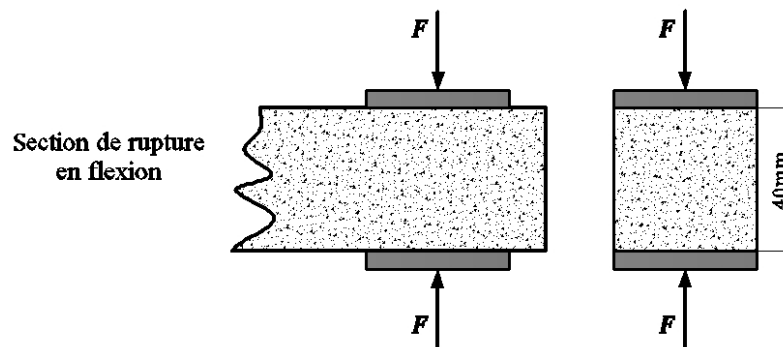


Figure II.14 :Dispositif pour l'essai de compression simple

La résistance à la compression est calculée selon l'équation suivante :

$$R_c = \frac{F_c}{B^2}$$

R_c : Résistance à la compression en (MPa) ;

F_c : Charge de rupture en (N) ;

B : Côte de l'éprouvette (mm).



Figure II.15 : Eprouvettes après essai d'écrasement en compression simple

4.5.2. Essais non destructifs (Essai de l'ultrason)

Connu sous le nom d'essai aux ultrasons, cet essai permet de déterminer la vitesse de propagation d'ondes longitudinales (de compression) à travers un élément en béton ou en mortier. Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde à parcourir une distance donnée. Cet essai est choisi car elle peut nous donner une indication sur la propagation des fissures à l'intérieur des mortiers élaborés. La vitesse de propagation d'ondes est d'autant plus élevée que le béton est plus dense donc plus résistant.

L'appareil comprend avec capteurs mis en contact avec le mortier, un générateur d'ondes, un amplificateur, un circuit de mesure du temps et un affichage digitale du temps mis par les ondes longitudinales pour traverser le béton entre les transducteurs, la vitesse d'onde, dans un milieu homogène, isotrope et élastique.⁵



Figure II.16 :Appareil de l'ultrason utilisé

Avant de procéder aux essais à l'ultrason, on a pris le soin de vérifier le bon fonctionnement par étalonnage de l'appareil en utilisant le barreau de calibrage.



Figure II.17: Etalonnage de l'ultrason à l'aide du barreau

La procédure de l'essai consiste à placé, après la mise en place de (L'éprouvette sur le dispositif de l'essai de flexion en trois points, sur les faces opposées de l'éprouvette (sur la longueur) on a placé les deux transducteurs (voir figure II.18) en interposant entre eux une couche mince de graisse (vaseline), puis l'enregistrement du temps de transit en micro seconde est réalisé. Ensuite, les mesure sont effectués à chaque taux d'accroissement de la résistance par rapport la résistance maximale.



Figure II.18 : Eprouvette avec la disposition des transducteurs

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté la caractérisation des différents matériaux utilisés dans la formulation de nos mortiers, (ciment, sable, eau de gâchage), les conclusions qu'on peut tirer de cette caractérisation sont :

D'après les résultats de ces essais de caractérisation, réalisés sur les trois sable, on peut conclure que : les trois sables étudiés présentent des courbes granulaires légèrement étalés. Ils sont classés comme des sable fin à grossier. Ce sont des sables propres avec des coefficients d'absorption faible.

Les résultats des essais formulation ont données que la consistance des trois mortiers élaborés est fluide. Nous remarquons que le mortier MSC a un temps d'écoulement élevé par rapport aux autres mortiers MSD et MSA.

A la fin de ce chapitre les essais destructifs et non destructifs, réalisés sur les trois mortiers élaborés à l'état durcis, sont présentés.

CHAPITRE III



Présentation et
Discutions des
Résultats

1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats des essais expérimentaux réalisés sur les trois mortiers étudiés.

On a commencé par présenter et discuté les résultats des essais destructifs, à savoir les essais de compression simple et les essais de flexion en trois points. Ensuite, on a présenté les résultats des essais non destructifs, à savoir les essais d'auscultation dynamique ou l'essai d'ultrason. A la fin de ce chapitre des corrélations simples et convenables reliant les mesures de la résistance à la compression du béton par essais destructifs (écrasement des éprouvettes) avec ceux trouvées par essais non destructifs (ultrason) ont été établie. Ces corrélations sont développées sur des mortiers fabriqués en laboratoire à base des sables.

Ce chapitre est clôturé par certaines conclusions tirées sur la base des résultats trouvés.

2. RESISTANCE MECANIQUE

L'évolution de la résistance à la compression et de la résistance à la flexion en fonction de la durée de conservation pour les trois mortiers confectionnés sont représentées par les figures III.1 et III.2, respectivement. Ces résultats montrent que les résistances mécanique, des trois mortiers, croît d'une manière rapide au jeune âge (< 3 jours), ceci s'explique par diminution rapide de la quantité d'eau de gâchage qui favorise la réaction d'hydratation de ciment. Après l'âge de trois jours, le départ de l'eau du au séchage provoque une perturbation dans les réactions d'hydratation et par conséquent l'évolution de la résistance devient de plus en plus lente.

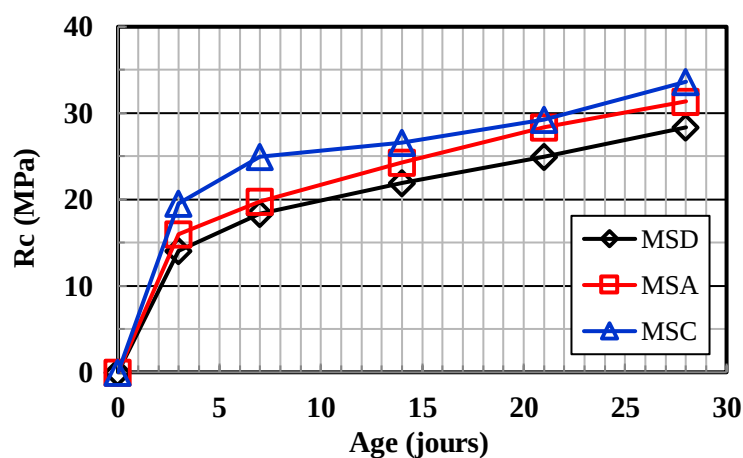


Figure III.1 : Résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers étudiés

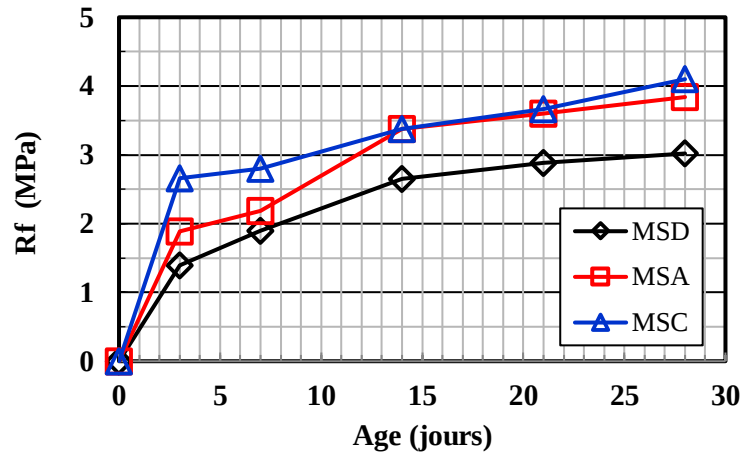


Figure III.2 : Résistance à la flexion en fonction de l'âge des mortiers étudiés

Nous remarquons que les mortiers ordinaires composés de mélanges sable alluvionnaire et sable calcaire, confèrent des résistances meilleures par rapport au mortier ordinaire à base de sable dunaire. En effet, pour la résistance à la compression simple à 28 jours, on a enregistré pour le MSC et le MSA de l'ordre de 34 MPa et 31 MPa respectivement par rapport à celle du MSD qui est de l'ordre de 28 MPa. Concernant la résistance à la flexion à 28 jours, on a enregistré pour le MSC et le MSA de l'ordre de 4 MPa et 3,8 MPa respectivement par rapport à celle du MSD qui est de l'ordre de 3 MPa.

3. ESSAIS D'AUSCULTATION DYNAMIQUE

3.1. Effet de nature des granulats et de la granulométrie

La figure III.3 présente la variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, à travers les trois mortiers, pour les différents âges de maturation.

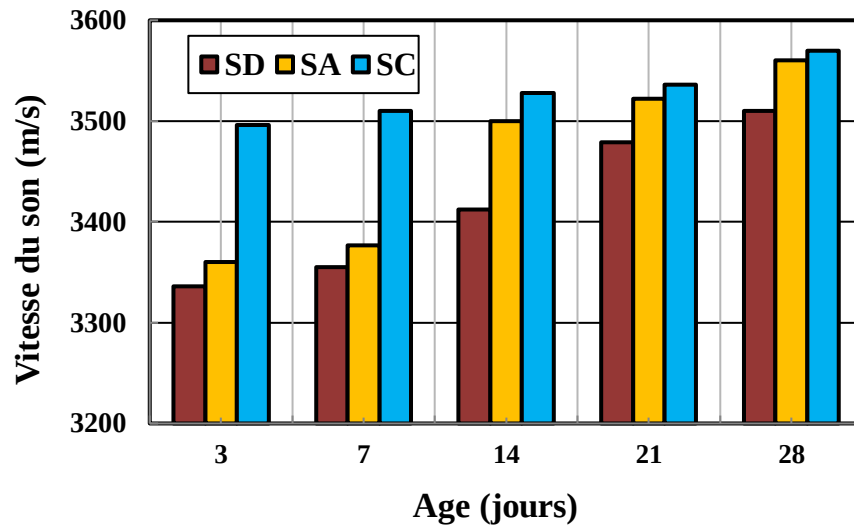


Figure III.3 : Variation de la vitesse de propagation des ondes ultrasonique en fonction de l'âge de conservation pour les trois mortiers étudiés.



Figure III.4 : Etats de surfaces de la fissure des trois mortiers étudiés après essais de flexion

D'après cette figure nous remarquons qu'au jeune âge, à partir du (3 jours) la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers le mortier à base de sable calcaire MSC, est la plus rapide par rapport aux deux autres mortiers MSA et MSD. Elle varie légèrement en fonction de l'âge de conservation. Par contre, pour les deux mortiers MSA et MSD, la vitesse varie significativement en fonction de l'âge de conservation et cela est bien remarqué entre le 7ème et le 14ème jour. Cela, est peut être expliqué par le fait, qu'au jeune âge, c'est le rôle de la compacité du mortier MSC qui a donné des vitesses plus élevées, vu la distribution granulaire plus étalée et la forme des granulats angulaires du sable calcaire (voir figure III.3). Par la suite, au-delà du 7ème jour, c'est le rôle de la pâte de ciment qui durcit en fonction du temps, dû au phénomène de l'hydratation de ciment. Pour cette raison nous remarquons bien

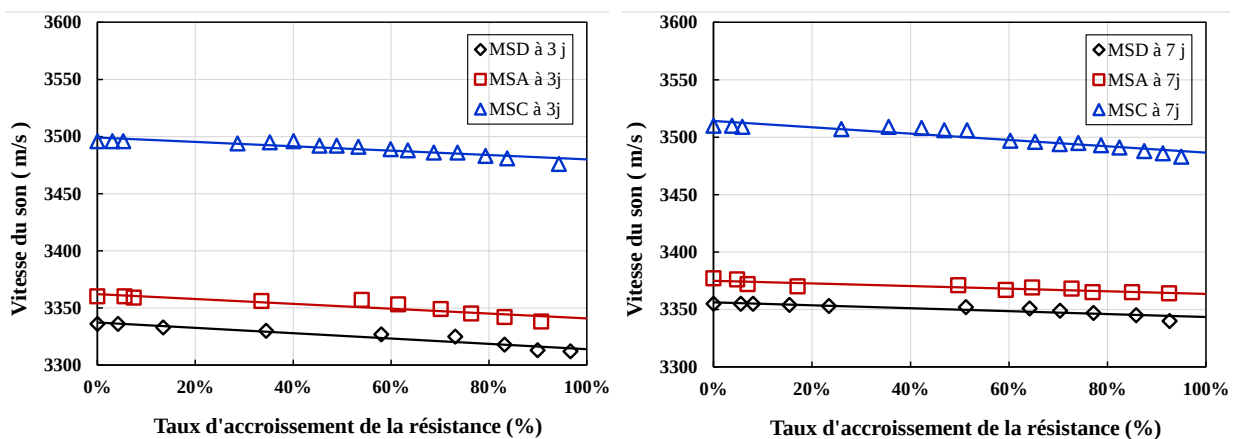
qu'au 28ème jour les vitesses de propagation à travers les trois mortiers sont presque identiques.

3.2. Effet de l'accroissement de la charge

L'étude de l'effet de l'accroissement de la charge sur la propagation du son, peut nous donner une indication sur la modification du mortier durci en précisons sur la modification de la pâte de ciment durci, du point de vu de l'apparition de certaines fissures au cours de l'essai d'écrasement. Pour cela, on a effectué les mesures de la vitesse de propagation du son en fonction du taux d'accroissement de la charge (vitesse de chargement 1 kg/s).

La figure III.5, présente la variation de la vitesse de propagation du son en fonction du taux d'accroissement de la charge, en cours de l'essais de flexion en trois points, pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation.

D'après cette figure, nous remarquons que, pour les différentes durées de conservation ou l'âge des mortiers étudiés, la vitesse de propagation du son décroître linéairement en fonction de l'accroissement de la charge. Ces décroissements de la vitesse de propagation du son sont peut-être dus à l'apparition de certaines fissures, aux niveaux des mortiers, en cours de l'essai de flexion, ou ces dernières vont augmenter le taux des vides au niveau des éprouvettes et par conséquent la vitesse de propagation du son diminue.



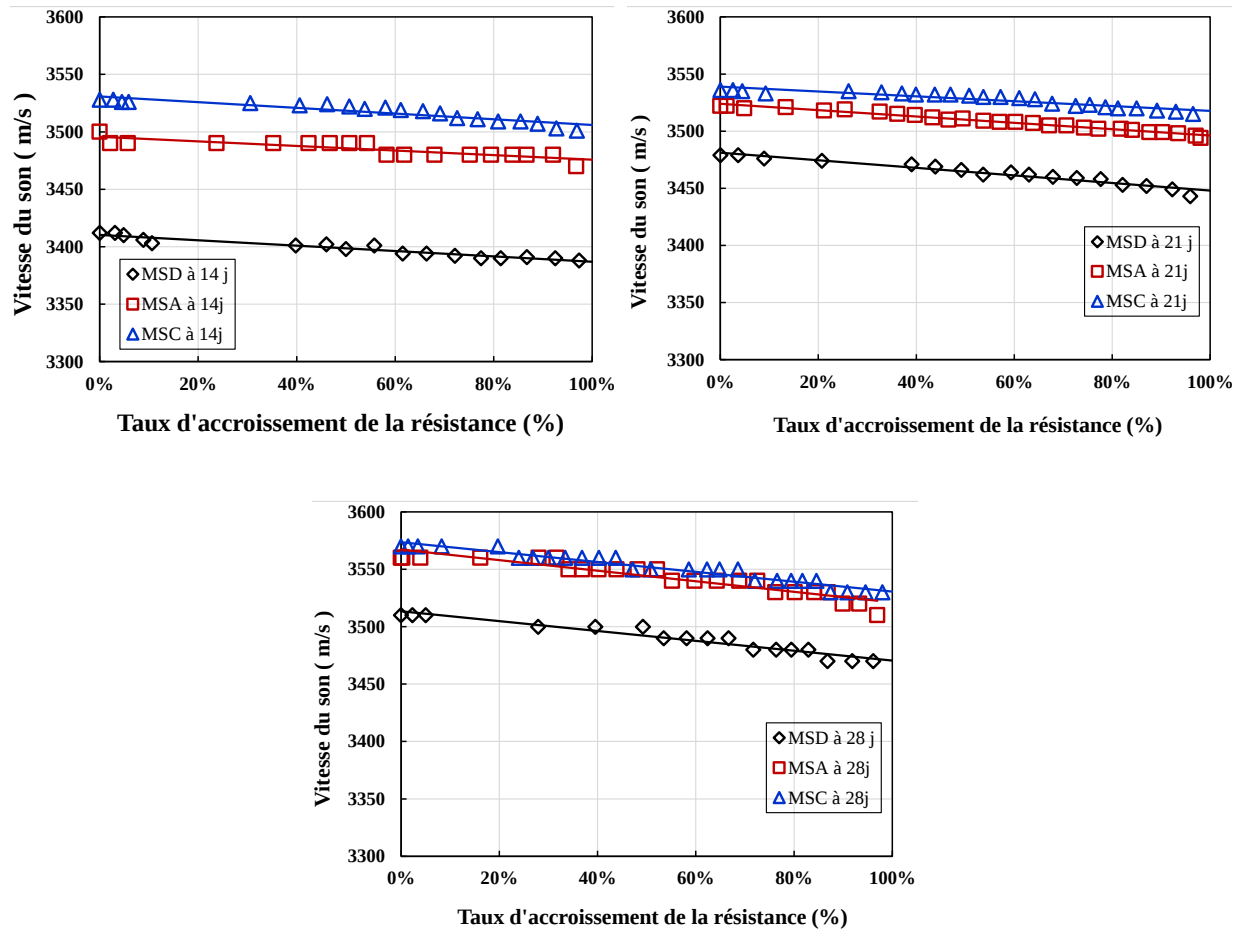


Figure III.5 : Variation de la vitesse du son en fonction du taux d'accroissement de la résistance à la flexion pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation

Des courbes de corrélation linéaires sont établies entre les vitesses de propagation du son « V » et le taux d'accroissement de la charge en flexion « $aR = R_{fi}/R_{fmax}$ » en fonction de l'âge des mortiers, sont récapitulés au tableau III.1.

Si nous nous considérons que les pentes des relations des « V » en fonction de « $aR = R_{fi}/R_{fmax}$ », présente les vitesses d'apparition ou de propagation des fissures dans les éprouvettes.

A l'âge du 3^{ème} jour, nous remarquons que la vitesse de propagation des fissures dans les éprouvettes des mortiers MSD et MSA est plus rapide par rapport aux éprouvettes du mortier MSC. Cela, est peut-être dû à la forme angulaire des grains du sable calcaire qui augmente la friction au cours de l'écrasement. Entre le 7^{ème} et le 21^{ème} jour, la vitesse de propagation des fissures augmente rapidement dans les éprouvettes des mortiers MSD et MSA de 12,68 à 33,26 et de 11,41 à 27,75 respectivement, tandis que celle du mortier MSC

reste quasiment constante. Au 28^{ème} jour, nous remarquons que la vitesse de propagation des fissures pour tous les mortiers est presque identique, vu que les trois mortiers ont la même quantité de ciment (1/3) ce qui signifie qu'après la fin d'hydratation (28 jours) il n'y aura pas de modification dans la pâte de ciment. Ces résultats confirment que la vitesse de propagation des ondes dépend des modifications de la pâte de ciment durci.

Tableau III.1 : Les relations établies entre « V » et « $aR = R_{fi}/R_{fmax}$ »

Age (jours)	SD	SA	SC
3	$V = -23,43aR + 3337,3$	$V = -21,23aR + 3362,1$	$V = -19,12aR + 3499,2$
7	$V = -12,68aR + 3356,2$	$V = -11,41aR + 3375$	$V = -27,72aR + 3514,2$
14	$V = -23,36aR + 3410,2$	$V = -19,83aR + 3495,6$	$V = -24,78aR + 3530,8$
21	$V = -33,26aR + 3481,2$	$V = -27,75aR + 3523,9$	$V = -21,10aR + 3538,9$
28	$V = -42,00aR + 3513,4$	$V = -45,88aR + 3567,1$	$V = -42,91aR + 3573,5$

R_{fi} : la résistance à la flexion à l'instant i de mesure de la vitesse du son ;

R_{fmax} : la résistance à la flexion maximale ;

3.3. Corrélation entre la résistance et la vitesse ultrasonique

Les figures III.6a-6d et III.7a-7-d, présentent, respectivement, les courbes de corrélation établies entre les résistances à la compression et la résistance traction par flexion « R_f » avec la vitesse ultrasonique « V » correspondante. Les expressions proposées à ces corrélations sont deux relations moyennes, établies à partir de la figure III.6d, et III.7d, respectivement, de forme exponentielle présentées par les équations :

$$R_C = 9 \cdot 10^{-4} \cdot e^{0,003 \cdot v}$$

$$R_f = 9 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0,004 \cdot v}$$

D'après la figure III.6, nous remarquons que les vitesses de propagation augmentent avec le temps de conservation pour les différents mortiers étudiés. Le mortier à base de sable calcaire est donne des grandes valeurs des vitesses de propagation du son par rapport aux autres mortiers à base de sable alluvionnaire et dunaire. Ces résultats sont en concordance avec celles trouves pour les résistances à la compression et à la traction par flexion

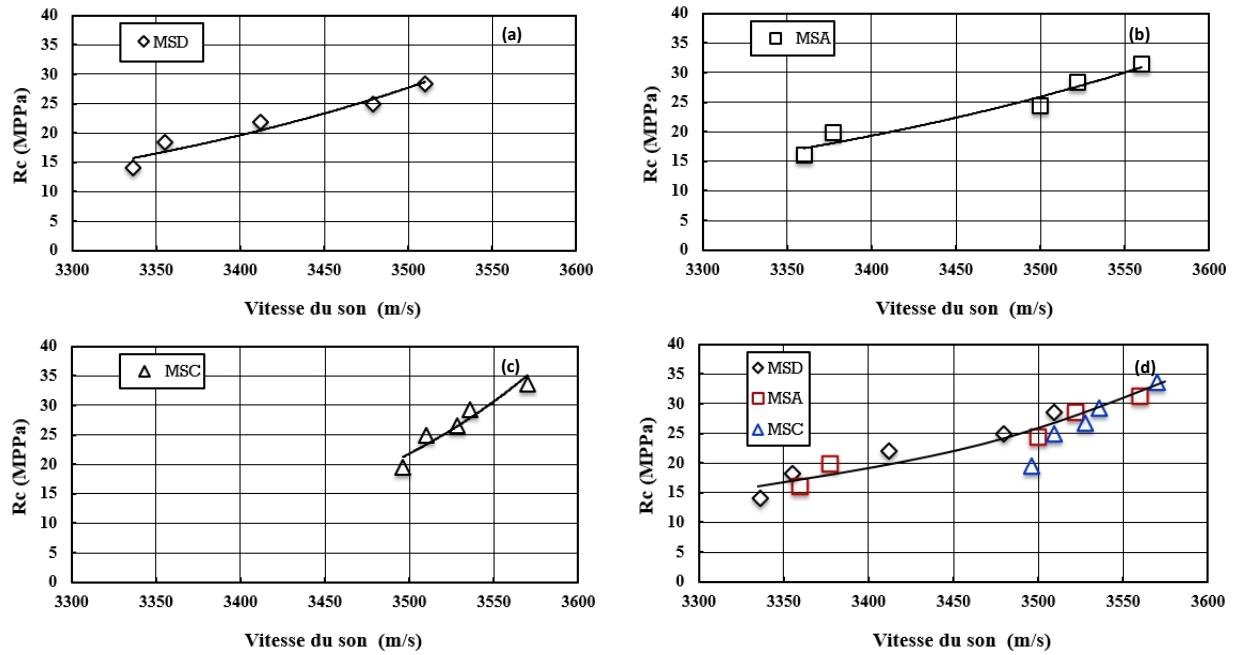


Figure III.6 :Corrélation Résistance à la compression – Vitesse ultrasonique pour les différents mortiers étudiés

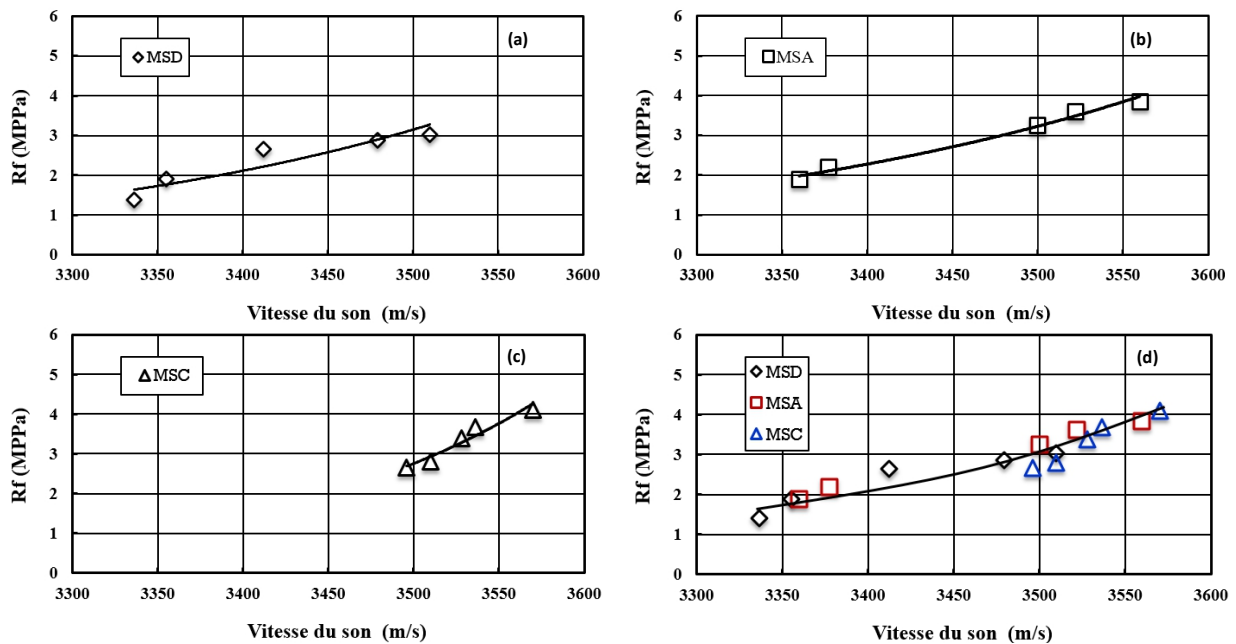


Figure III.7 :Corrélation Résistance à la flexion – Vitesse ultrasonique pour les différents mortiers étudiés

On peut dire qu'il existe une bonne corrélation entre les résistances à la compression « R_c » et la traction par flexion « R_f » et les vitesses de propagation du son correspondantes pour l'ensemble des différents mortiers examinés. Ces résultats coïncident avec celles trouvés par BOUKHELKHAL Djamila1, KENAI Saïd, [12].

Nous remarquons, d'après les figures III.6d et III.7d que la plage des vitesses varie en fonction du type de mortier ($3336 \text{ m/s} \leq V \leq 3570 \text{ m/s}$). Le mortier à base de sable de dune présente une plage, de vitesse varie entre $3336 \text{ m/s} \leq V \leq 3510 \text{ m/s}$, plus faible par rapport aux autres mortiers à base de sable alluvionnaire et à base de sable calcaire qui présentent des plages de vitesse varient respectivement entre $3360 \text{ m/s} \leq V \leq 3560 \text{ m/s}$ et $3496 \text{ m/s} \leq V \leq 3570 \text{ m/s}$.

3.4. Estimation des modules d'élasticité

Les valeur des module d'élasticité statique et dynamique des différents mortiers étudiés sont estimés à partir de deux méthodes, celle donnée par le BAEL 91 et celle proposée par Hassan Münzer, basée sur la vitesse de propagation du son (1994) [13].

a- Selon les règles BAEL91 :

- Le module d'élasticité E_C est calculé selon la formule suivante donnée :

$$E_C = 3700 \cdot \sqrt[3]{R_C}$$

- Le module d'élasticité dynamique déterminé par l'équation :

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

Où : γ : masse volumique apparente du mortier en (t/m^3), pour différents période de conservation;

ν : coefficient de Poisson, pris égale 0,2,

V : vitesse du son mesuré pour différents période de conservation [km/s]

b- Selon la vitesse du son [12] :

- Le module d'élasticité donné en fonction de la constante (K) :

$$E_C(V) = k \cdot V^2$$

Avec : $k = 1.68$ pour $t \geq 180$ jours ;

$k = t^{0.1}$ pour $t < 180$ jours ; t : âge du béton en jours

La masse volumique estimée, en (t/m^3), selon l'équation suivante [12] :

$$\gamma_V = 1,67 + 0,155 \cdot V$$

- Le module d'élasticité dynamique :

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

La figure III.8, présente les valeurs des modules d'élasticité calculé et estimé selon les deux méthodes cité supra.

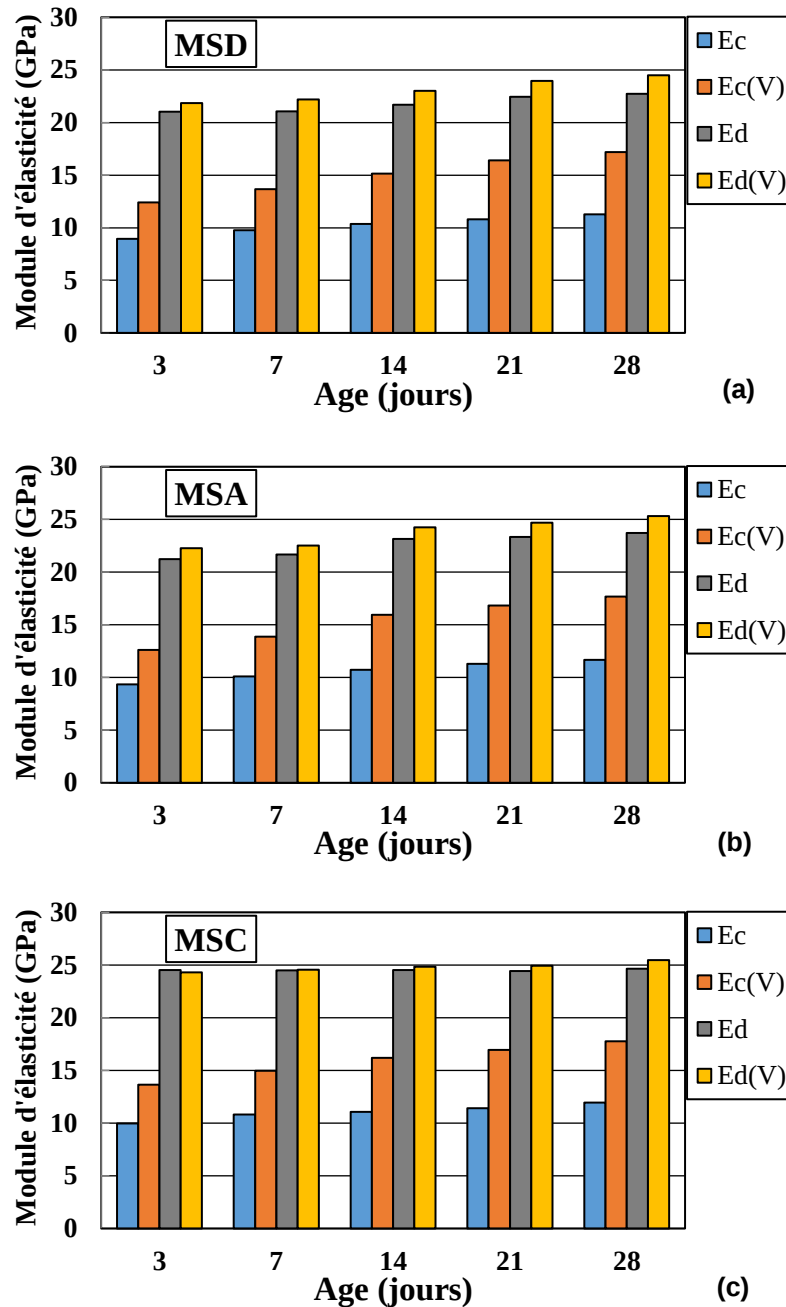


Figure III.8 : Comparaison de différentes valeurs de module d'élasticité (statique et dynamique) estimés pour les différents mortiers étudiés

D'après la figure III.8, nous remarquons que pour les différents mortiers étudiés, les valeurs des modules statiques ou dynamiques estimés par la méthode d'auscultation

dynamique (ultrason) sont légèrement supérieures à celles calculés par la méthode donnée en BAEL 91. Les modules d'élasticité statiques ou dynamiques, pour les différents mortiers étudiés, varient en fonction de l'âge des éprouvettes.

3.5. Estimation des modules d'élasticité en fonction de l'accroissement de la charge

On a essayé de faire une Estimation des modules d'élasticité en fonction de l'accroissement de la charge, dont l'objectif de voir l'effet de cette dernière sur la rigidité de nos mortiers élaborés.

La figure III.9-III.11, présentent les variations du module d'élasticité dynamique (à partir du BAEL91), le module dynamique et le module statique exprimés à partir de la vitesse de propagation du son en fonction du taux d'accroissement de la charge de l'essai de flexion en trois points, pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation.

D'après ces figures, nous remarquons que, pour les différentes durées de conservation ou l'âge des mortiers étudiés, les différents modules d'élasticité décroissent linéairement en fonction de l'accroissement de la charge. Ces décroissements traduisent la fragilité des mortiers étudiés dû à l'apparition de certaines fissures en cours de l'accroissement de la charge de l'essai de flexion.

Des courbes de corrélation linéaires sont établies entre les différents modules d'élasticité « E_d , $E_d(v)$ et E_c » et le taux d'accroissement de la charge en flexion « $aR = R_{fi}/R_{fmax}$ » en fonction de l'âge des mortiers, sont récapitulés au tableau III.2.

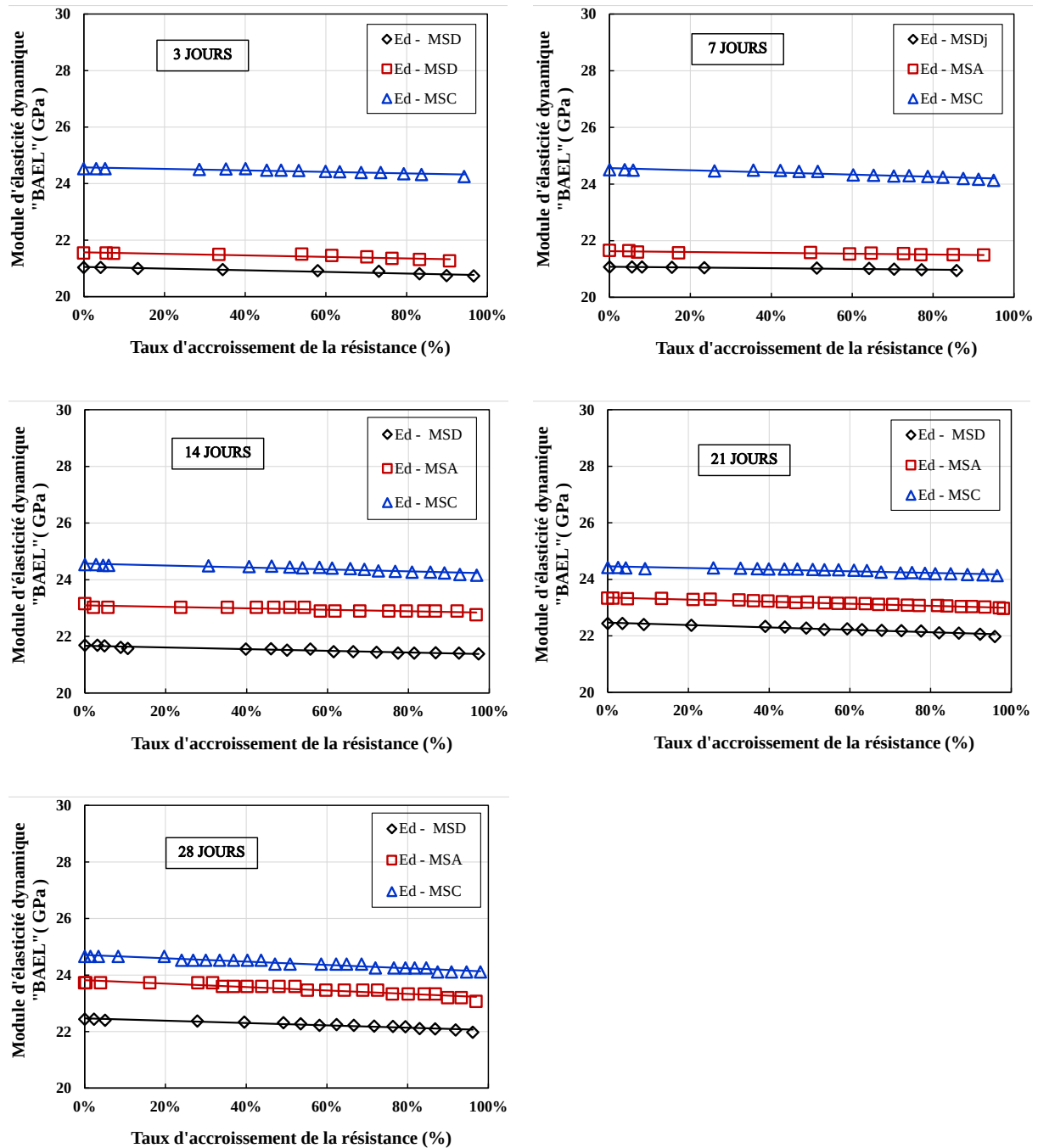


Figure III.9 : Variation du module d'élasticité dynamique E_d (BAEL91) en fonction du taux d'accroissement de la résistance à la flexion pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation

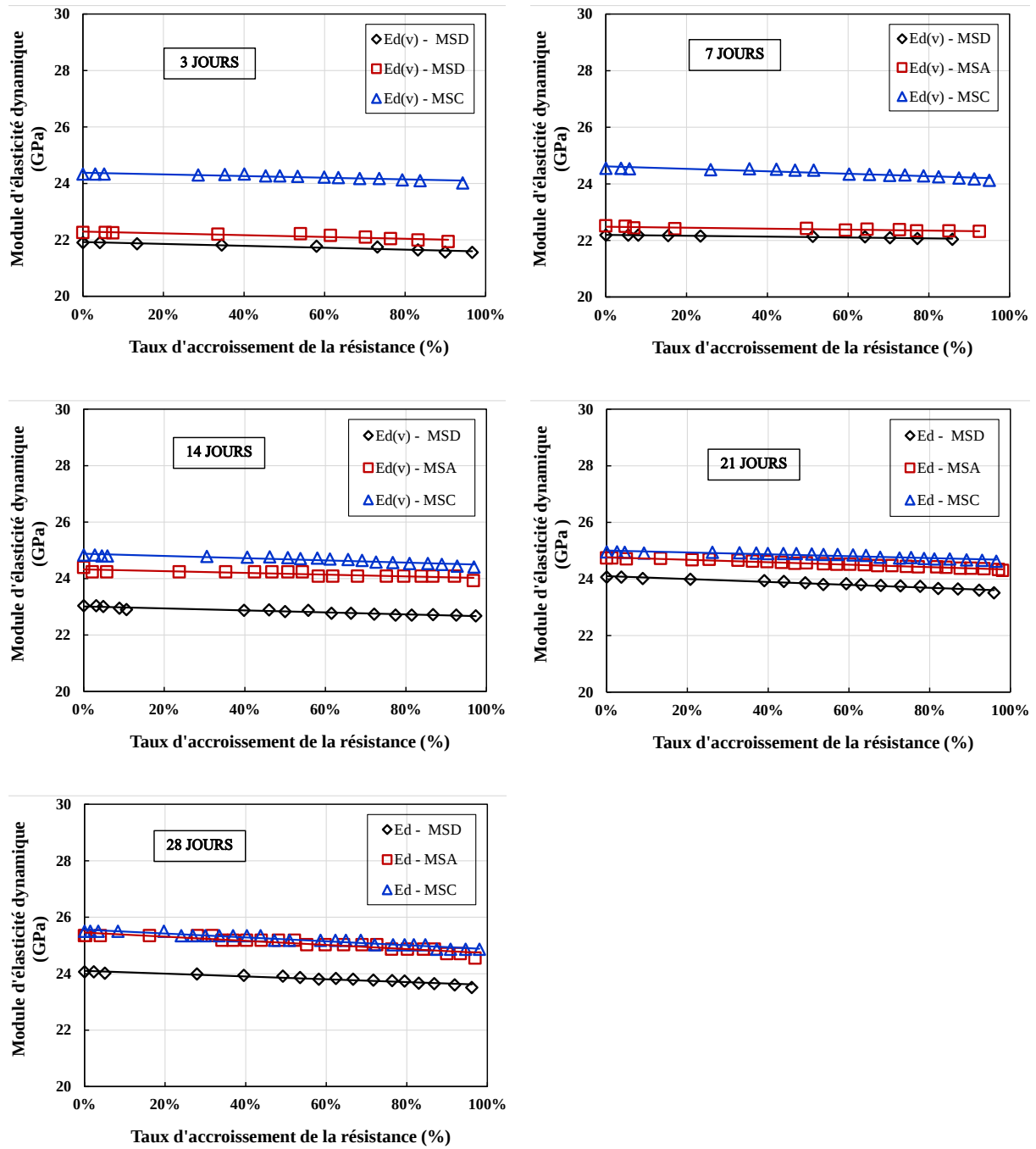


Figure III.10 : Variation du module d'élasticité dynamique $E_d(v)$ (selon la vitesse du son) en fonction du taux d'accroissement de la résistance à la flexion pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation

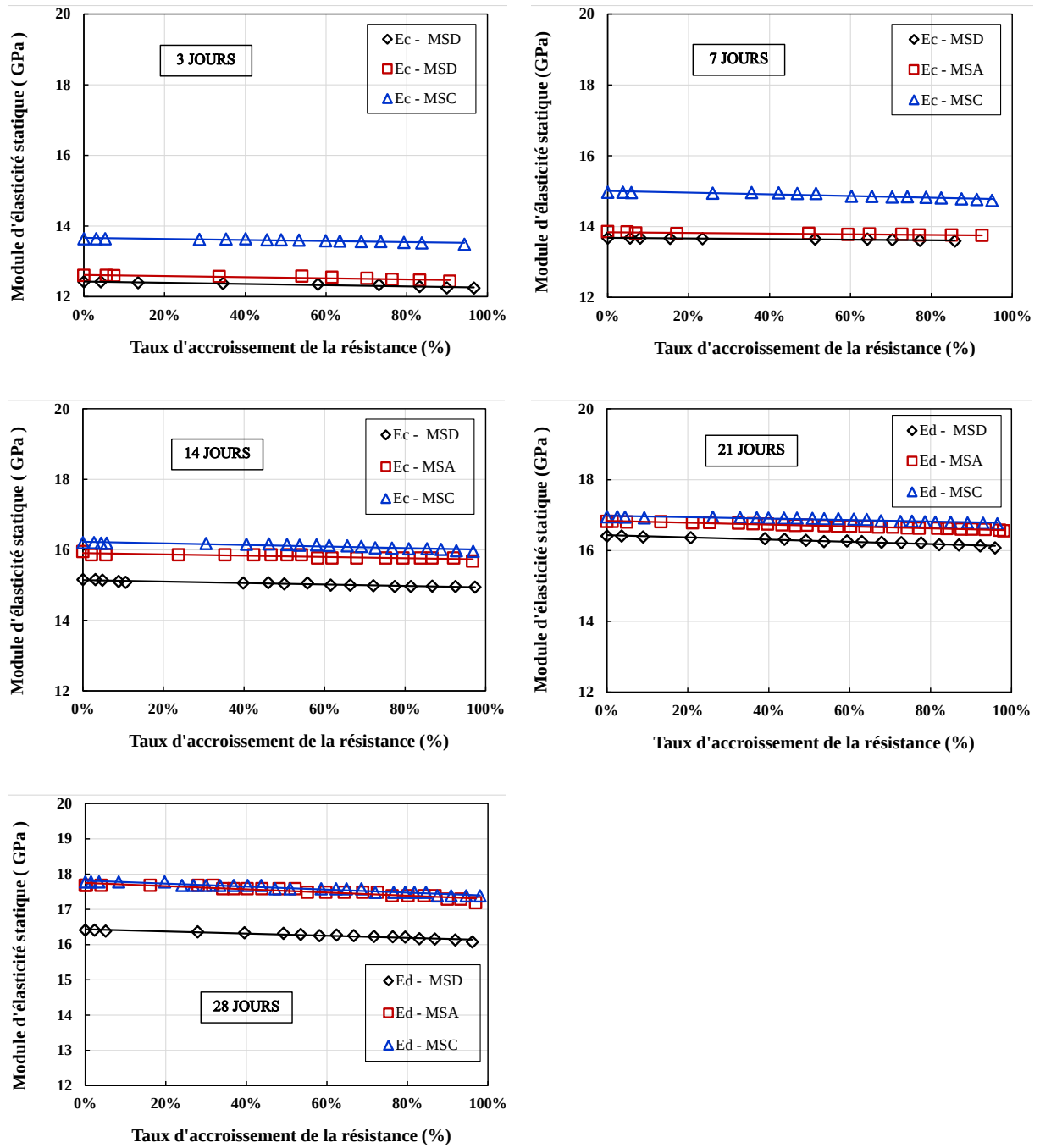


Figure III.11 : Variation du module d'élasticité statique E_c (selon la vitesse du son) en fonction du taux d'accroissement de la résistance à la flexion pour les différents mortiers étudiés et pour les différents âges de conservation

Tableau III.2 : Les relations établies entre les modules d'élasticité « E_d , $E_d(v)$ et E_c » et le taux d'accroissement de la charge « $aR = R_{fi}/R_{fmax}$ »

Temps de conservation	Mortier	E_d (BAEL91)	$E_d(v)$ (ultrason)	E_c (ultrason)
3 jours	MSD	$E_d = -0,27aR + 24,57$	$E_d(v) = -0,30aR + 24,38$	$E_c = -0,15aR + 13,66$
	MSA	$E_d = -0,27aR + 21,57$	$E_d(v) = -0,31aR + 22,29$	$E_c = -0,16aR + 12,62$
	MSC	$E_d = -0,29aR + 21,05$	$E_d(v) = -0,34aR + 21,93$	$E_c = -0,17aR + 12,43$
7 jours	MSD	$E_d = -0,39aR + 24,56$	$E_d(v) = -0,43aR + 24,62$	$E_c = -0,24aR + 15,00$
	MSA	$E_d = -0,15aR + 21,63$	$E_d(v) = -0,17aR + 22,48$	$E_c = -0,09aR + 13,84$
	MSC	$E_d = -0,13aR + 21,08$	$E_d(v) = -0,15aR + 22,20$	$E_c = -0,08aR + 13,68$
14 jours	MSD	$E_d = -0,34aR + 24,57$	$E_d(v) = -0,39aR + 24,88$	$E_c = -0,23aR + 16,23$
	MSA	$E_d = -0,26aR + 23,09$	$E_d(v) = -0,31aR + 24,32$	$E_c = -0,18aR + 15,91$
	MSC	$E_d = -0,30aR + 21,67$	$E_d(v) = -0,35aR + 23,01$	$E_c = -0,20aR + 15,14$
21 jours	MSD	$E_d = -0,29aR + 24,46$	$E_d(v) = -0,33aR + 25,01$	$E_c = -0,20aR + 16,98$
	MSA	$E_d = -0,37aR + 23,36$	$E_d(v) = -0,44aR + 24,77$	$E_c = -0,26aR + 16,84$
	MSC	$E_d = -0,43aR + 22,47$	$E_d(v) = -0,51aR + 24,10$	$E_c = -0,31aR + 16,43$
28 jours	MSD	$E_d = -0,59aR + 24,71$	$E_d(v) = -0,68aR + 25,56$	$E_c = -0,43aR + 17,81$
	MSA	$E_d = -0,61aR + 23,82$	$E_d(v) = -0,79aR + 25,45$	$E_c = -0,45aR + 17,75$
	MSC	$E_d = -0,42aR + 22,47$	$E_d(v) = -0,50aR + 24,10$	$E_c = -0,30aR + 16,43$

5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a présenté et discuter les résultats des essais destructifs, à savoir les essais de compression simple et les essais de flexion en trois points. Ensuite, on a présenté les résultats des essais non destructifs, à savoir les essais d'auscultation dynamique ou l'essai d'ultrason.

D'après ces résultats on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Les mortiers ordinaires composés de mélanges sable alluvionnaire et sable calcaire, confères des résistances meilleures par rapport au mortier ordinaire à base de sable dunaire.

- La granulométrie des sables utilisés a une grande influence sur la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques. Tant que la distribution granulaire est étalée tant que la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques est rapide.
- La finesse du sable joue un rôle très important dans la propagation de la vitesse des ondes ultrasoniques.
- Il est possible de développer des bonnes corrélations entre la résistance à la compression par écrasement et les mesures non destructives correspondantes (vitesse ultrasonique) pour les trois mortiers examinés.
- Pour les trois mortiers examinés, des bonnes corrélations entre les modules d'élasticité statiques ou dynamiques et les mesures non destructives correspondantes (vitesse ultrasonique), ont donnés des valeurs presque identiques à celles calculés par la méthode donnée en BAEL 91.



Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Cette étude sur la propagation des fissures dans un élément structural soumise à une sollicitation simple. Dans cette étude l'étape de l'amorçage de l'entaille n'a pas été prise en compte en considérant que l'entaille se comporte dès le début comme une fissure physique.

On a opté d'étudier la propagation des fissures en fonction du taux d'accroissement de la charge au niveau des éléments. Pour l'ensemble de notre étude expérimentale, en tous 90 éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$), pour les trois mortiers, ont été testés par des essais destructifs à savoir la résistance en compression et la résistance à la traction par flexion et des essais non destructifs par la mesure de la propagation des fissures par des essais d'auscultation dynamique (ultrason).

D'après les résultats des essais destructifs (les essais de compression simple et les essais de flexion en trois points) et les résultats des essais non destructifs (auscultation dynamique ou ultrason), on a pu tirer les conclusions suivantes :

- Au jeune âge, la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers les mortiers élaborés MSC, MSA et MSD dépend de la taille et la forme des grains. En fonction du temps de durcissement cette vitesse de propagation des ondes ultrasoniques dépend de l'hydratation de ciment ou le durcissement dû à la pâte de ciment. A long terme (après 28 jours), cette vitesse de propagation des ondes ultrasoniques est ne varie plus avec le types de sable.
- L'accroissement de la charge provoque l'apparition de certaines fissures (non visibles) et par conséquent l'augmentation du volume des vides au niveau des éprouvettes, qui sont traduit par la diminution de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques à travers les éprouvettes des différents mortiers élaborés. Cette diminution est sous forme d'une fonction linéaire.

- Des corrélations sous forme des relations exponentielles entre la résistance à la compression par écrasement et les mesures non destructives correspondantes (vitesse ultrasonique) sont établies, pour les trois mortiers examinés.
- Des bonnes corrélations entre les modules d'élasticité statiques ou dynamiques et les mesures non destructives correspondantes (vitesse ultrasonique), ont donnés des valeurs presque identiques à celles calculés par la méthode donnée en BAEL 91.

PERSPECTIVES

Au cours de l'étude expérimentale on a essayé de faire des mesures de l'apparition des fissures par la mesure du transfert thermique, mais malheureusement notre tentative à échoué (problème technique et de temps).pour cela, et comme perspective de cette étude, sur la propagation d'une fissure, nous aimerons bien que d'autres recherches, font l'objet des points suivants :

- Etude de propagation des fissures à long terme (après 28jours) ;
- Etude de propagation des fissures par le biais des essais de transferts de chaleur ;
- Etude de propagation des fissures à la fatigue ;
- Etude de propagation des fissures sous chargement thermique ;



Références Bibliographiques

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

- [1] T.TOUHAMI. « Fissuratin en béton avec référence particulière au béton à haute performance», thèse de Magister en Génie Civil, USTHB ; Algérie, 2006, P.120.
- [2] DE LARRARD François, « Construire en béton, l'essentiel sur les matériaux», Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2002. P.23.34.63.77.78.81.
- [3] Cours de Mme Feugeas, INSA de Strasbourg, Janvier 2001
- [4] CHANVILARD Gilles. « Le matériau béton : connaissance générale », les cours de l'ENTPE, ALEAS, Editeur, Octobre 1999. P.46.122.125.127.130.
- [5] BARON & OLLIVIER. « La durabilité des bétons », presses de l'Ecole Nationale des ponts et chaussées, Paris, 1992, P.28.100.111.113.119.
- [6] DREUX Georges et FESTA Jean, « Nouveau guide du béton et de ses constituants», Editions Eyrolles, Huitième Edition, Paris, 2002.P.71.146.
- [7] B.A.E.L. 91, Révisé 99 (DTUP18-702).
- [8] ACKER Paul, « Retraits et fissurations du béton», Association Française pour la Construction, Septembre 1992
- [9] CIMBéton, « La vibration des bétons »,B 71, Collection Technique Cimbéton, www.cimbeton.asso.fr
- [10] LISSANDRE LAURE. « Analyse de la fissuration des bétons et des techniques de mise en œuvre en vue d'optimiser la réalisation des ouvrages », Mémoire de fin d'études, INSA de Strasbourg, Juin 2006.
- [11] A.MASSON. « Fissuration », guides CATED des techniques du bâtiment copyright 11/94, synthèse validée 1999, p.111.

- [12] Djamila Boukhelkhal, Said Kenai. Détermination non destructive de la résistance du béton sur site (Scléromètre & Ultrason). Rencontres Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France.
- [13] Munzer Hassan, Critères Découlant D'essais De Charge Pour L'évaluation Du Comportement Des Ponts En Béton Et Pour Le Choix De La Précontrainte, Thèse N° 1296 (1994) Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne.
- [14] K.GADRI, A. GUETTALA. « Evaluation du module d'élasticité à la compression à l'aide des techniques non destructives ».
- [15] Paco Diederich, 2010. Contribution à l'étude de l'influence des propriétés des fillers calcaires sur le comportement autoplaçant du béton. Thèse de doctorat, Université Toulouse III - Paul Sabatier.
- [16] G. DREUX & J. FESTA. « Nouveau guide du béton et de ses constituants », Eyrolles 1998, 8^{ème} édition, P.406.
- [17] LA FABRICATION, caractéristiques chimiques, minéralogiques et physiques.
- [18] Venuat.M : La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.
- [19] Analyse de la fissuration des bétons et des techniques de mise en œuvre en vue d'optimiser la réalisation des ouvrages. P.11.15.

عنوان المذكرة : دراسة انتشار التشققات في أنواع من المونة المصنوعة من رمال متنوعة خاضعة لضغوط

بسيطة

الإسم: سكينه و نور الهدى

اللقب: جقيدل و قنان

المؤطر: قوال إدريس و فرحات أحميدة

ملخص: تهدف هذه الدراسة إلى فهم ظاهرة انتشار التشققات على مونة خاضعة لضغوط بسيطة وتأثيرها على قدرتها على التحمل، ومدى قابليتها للخدمة والديمومة، حيث تركز هذه الدراسة على ثلاثة أنواع من المونة، مصنوعة من ثلاثة أنواع من الرمل (الكثبان، الوادي، الجيري) بعد دراسة المواد الأساسية وصياغة أنواع المونة الثلاث، تضمن البرنامج التجريبي دراسة تطور المقاومة الميكانيكية للضغط والانحناء لأنواع المونة المنجزة بدلالة الزمن، ولدراسة تأثير زيادة الحمل على ظهور الشقوق تم إجراء قياس سرعة الصوت قبل و أثناء إجراء اختبارات الانحناء لكل زمن مسجل، ومن خلال النتائج المحصل عليها، تم تسليط الضوء على تأثير نوع الرمل على المقاومة الميكانيكية وظهور و انتشار الشقوق، وفي الأخير إن الطبيعة الجيرية والشكل الزاوي للحبيبات وارتفاع القطر الأقصى والتوزيع الحبيبي الجيد لهم أثر كبير على السلوك الميكانيكي ومقاومة ظهور وانتشار الشقوق.

كلمات مفتاحية : التشققات، مونة، ضغوط بسيطة، قياس سرعة الصوت ، المقاومة الميكانيكية.

Memory title : Study of propagation of cracks in a mortar based on sand different submitted to simple solicitations

Name : DJEKIDEL et GUENANE

First name : Soukaina et Nour El Houda

Directed by : GOUAL Idris et FERHAT Ahmida

Abstract : The aims of this study is understanding the phenomenon of the appearance and the propagation of the cracks in a mortar based on different sand subjected to simple solicitations and its effects on its bearing capacity, its servicability and its durability. The study is focused on three mortars made from three sands (dune, alluvial and limestone). After characterization of the basic materials and formulation of the three mortars. An experimental program involves the study of the evolution of the mechanical resistance to compression and bending of our mortars as a function of time. Tests for measuring the speed of dynamic auscultation, for each conservation time, before flexural tests and during the test, are carried out whose objective is to study the effect of the appearance and propagation of cracks. Finally, the calcareous nature of the angular shape of the grains, the high maximum diameter, and the good granular distribution gave relatively great effect on the mechanical behavior and resistance to the appearance and propagation of cracks.

Key words: cracks, mortar, simple solicitations, dynamic auscultation, mechanical resistance.

Titre du mémoire : Etude de propagation des fissures dans un mortier à base des différents sables soumis à des sollicitations simples

Nom: DJEKIDEL et GUENANE

Prénom: Soukaina et Nour El Houda

Encadreur: GOUAL Idris et FERHAT Ahmida

Résumé : Cette étude vise à appréhender le phénomène de l'apparition et la propagation des fissures dans un mortier à base des différents sables soumis à des sollicitations simples et ses effets sur sa capacité portante, sa servicabilité et sa durabilité. L'étude est portée sur trois mortiers élaborés à base des trois sables (dunaire, alluvionnaire et calcaire). Après caractérisation des matériaux de base et formulation des trois mortiers. Un programme expérimental comporte l'étude de l'évolution des résistances mécaniques, à la compression et à la flexion, de nos mortiers en fonction du temps. Des essais de mesure de la vitesse d'auscultation dynamique, pour chaque temps de conservation, avant essais de flexion et en cours de l'essai, sont effectués dont l'objectif d'étudier l'effet de l'apparition et la propagation des fissures. En fin, la nature calcaire la forme anguleuse des grains, le diamètre maximal élevé, la bonne répartition granulaire ont donnés relativement un grand effet sur le comportement mécanique et la résistance à l'apparition et la propagation des fissures.

Mots clés : fissures, mortier, sollicitations simples, auscultation dynamique, résistance mécanique.