

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Civil



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine: INSTITUT DE TECHNOLOGIE  
Filière: GENIE CIVIL  
Option: STRUCTURES

Thème:

**Etude des propriétés mécaniques des mortiers additionnés  
de fillers calcaires : Comparaison entre des résultats  
des essais destructifs et non destructifs**

Présenté Par :

Seddiki Imane

Seddik Fatima Zohra

Devant le jury composés de :

Dr. Houmadi Youcef	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Kameche Zine El Abidine	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant
Dr. Aissa Mamoune Mohammed	MCA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur

*Année universitaire 2017/2018*

## **REMERCIEMENT**

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*Nous tenons à remercier notre promoteur **Mr Zine el abidine Kameche** pour son aide, son encouragement, ses précieux conseils et sa disponibilité tout au long de ce travail.*

*Nous aimerions exprimer notre gratitude et nos sincères remerciements à tous les membres du jury pour avoir bien voulu donner de leur temps pour lire ce travail et faire partie des examinateurs. Leurs critiques et commentaires seront bénéfiques pour enrichir nos connaissances dans ce domaine.*

*Un gros merci également à nos familles pour leurs soutiens aussi bien moral que financier et pour leurs sacrifices.*

**Seddiki J & Seddik F**

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents que nulle dédicace ne puisse exprimer*

*Mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur*

*Encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond*

*Amour et respect pour leurs grands sacrifices*

*A ma chère sœur : Chahinez*

*A mes deux frères : Djawed, Abd Madjid*

*A toutes ma famille, en particulière : ma tante Souad Zénagui*

*A mon binôme : Imane*

*A tous mes amis*

*A tous mes camarades de la classe*

*A tous ceux qui me connais*

*Seddik Fatima Zohra*

## *Dédicaces*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes chers parents que nulle dédicace ne puisse exprimer*

*Mes sincères sentiments, pour leur patience illimitée, leur*

*Encouragement contenu, leur aide, en témoignage de mon profond*

*Amour et respect pour leurs grands sacrifices*

*A mes deux chers frères : Abderahim et Omar*

*A mes sœurs : Lila, Fatima Zohra, Meriem*

*A tous mes oncles et tantes, cousins et cousines*

*A mon binôme : Fatima Zohra*

*A tous mes amis, en particulier : Sihem, Zahra, Iman, Amina*

*A tous mes camarades de la classe*

*A tous ceux qui me connais*

*Seddiki Imane*

## Résumé

Ce projet de fin d'étude est un travail de recherche qui vise à déterminer l'influence de différents dosages (10, 20 et 30 %) d'un sous-produit industriel (Fillers Calcaires de l'ENG d'El-Malah) sur le comportement mécanique de mortiers avec différents rapport E/L (0.45, 0.55 et 0.65) et à base d'un sable combiné (résistance à la compression, à la traction par flexion,...etc.). Dans cette étude, des essais non destructifs à l'aide de l'Ultrason représentent un objet principal et par conséquent, une corrélation peut donc être donnée entre des résultats des essais destructifs et non destructifs. Des essais complémentaires, à l'état frais et durci, tels que des mesures de l'air occlus, Cette étude est pour faire une comparaison entre l'essai destructifs et non destructifs.

**Mots clés :** *Fillers calcaires, mortier ordinaire, résistance mécanique, mesures ultrasoniques*

### Summary

This plan of the end of study is a research work which aims at determining the influence of different proportions (10, 20 and 30 %) industrial by-products (Fillers Calcaires of ENG of El-Malah) on the mechanical behavior of mortar with different report E/L (0.45, 0.55 and 0.65) and based on a combined sand (resistance to compression, to traction by inflexion, etc.). In this study, not destroying trials with the aid of Ultrasound represent a main object and as a result, a correlation can therefore be given between results of not destroying and destroying trials. Supplementary trials, in the hardened and cool state, such as measures of occluded air, this study are an approach simplified to see a comparison between trial destroying and not destroying.

**Key words:** *Calcareous Fillers, ordinary mortar, mechanical resistance, ultrasonic measures*

### الملخص

هذه الخطة في نهاية الدراسة هو العمل البحثي الذي يهدف إلى تحديد تأثير نسب مختلفة (10، 20% و 30%) من المنتجات الثانوية الصناعية (لملء الحجر الجيري من المهندس من المالح تموشنت) على السلوك الميكانيكي للملاط مع تقرير مختلف ه / لتر (0.45 ، 0.55 و 0.65) على أساس الجمع بين الرمل (مقاومة الضغط، إلى الثقل من بلاء، الخ). في هذه الدراسة، وليس تدمير محاكاتها بمساعدة الموجات فوق الصوتية تمثل الهدف الرئيسي، ونتيجة لذلك، يمكن لذلك أن تعطى بين النتائج لا هدم وتدمير المحاكات. محاكاتها التكميلية، في صلابة و منتهنة الدولة، مثل فتدايير المغطي الهواء، هذه الدراسة هو إجراء مقارنة بين المحاكمة تدمير وليس تدمير

**كلمات أساسية:** عادي لملء كلسي، الملاط ، مقاومة ميكانيكية، تدابير الموجات فوق الصوتية

## **Sommaire**

Introduction générale .....	1
Chapitre I. Synthèse bibliographique.....	3
I.1. Introduction .....	3
I.2. Historique de ciment .....	4
I.3. Fabrication de ciment.....	4
I.3.1. Le principe de la fabrication du ciment.....	5
I.3.2. Les constituants du ciment.....	7
I.4. Classification des ciments en fonction de leur composition .....	8
I.5. Hydratation du ciment Portland .....	10
I.5.1. Introduction .....	10
I.5.2. Hydratation des silicates .....	10
I.5.3. Hydratation des aluminates.....	11
I.5.4. Conclusion.....	11
I.6. Les ajouts minéraux .....	11
I.6.1. Introduction .....	11
I.6.2. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil .....	12
I.6.2.1. Intérêt du point de vue technique.....	13
I.6.2.2. Intérêt du point de vue économique.....	13
I.6.2.3. Intérêt du point de vue	
écologique.....	13
I.6.3. Rôle de l'ajout cimentaire .....	14
I.6.3.1. Rôle de la granulométrie de l'ajout.....	14
I.6.3.2. Rôle de pouzzolanique des ajouts cimentaires.....	14
I.6.4. Classification des ajouts .....	14
I.6.4.1. Les principaux ajouts minéraux inertes.....	14
I.6.4.2. Rôle des fillers calcaire.....	15
I.6.4.3. L'action des fillers calcaire.....	15
I.6.4.4. L'activité du fillers calcaire.....	18
I.7. Conclusion .....	19
Chapitre II. Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.....	20
Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.....	20
II.1. Introduction.....	21
II.2. Identification des matériaux .....	21
II.2.1. Le ciment.....	21
II.2.2. Les granulats .....	22
II.2.3. L'eau de gâchage .....	27
II.2.4. Les fillers calcaires.....	28



II.3. Formulation des mortiers .....	29
II.4. Essais à l'état frais des mortiers .....	30
II.5. Préparation des éprouvettes.....	31
II.6. Les essais destructifs.....	32
II.6.1. Résistance à la traction par flexion.....	32
II.6.2. Résistance à la compression.....	33
II.7. Les essais non destructifs.....	34
II.7.1. Essai de propagation des ondes ultrasonique.....	34
II.7.2. Essai de l'absorption capillaire .....	35
II.8. Compagne des essais expérimentaux réalisés .....	36
II.9. Mesures expérimentales et nombres d'éprouvettes testés .....	37
II.8. Conclusion .....	39
Chapitre III. Analyse et discussions des résultats.....	40
III.1. Introduction .....	40
III.2. Influence des fillers calcaires sur les propriétés physiques des mortiers à l'état frais.....	41
III.2.1. Mesure de la maniabilité.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.2.1. Mesure de l'air occlus .....	41
III.3. Influence des fillers calcaires sur la résistance mécanique des mortiers .....	42
III.3.1. Résistance à la traction par flexion .....	42
III.3.2. Résistance à la compression .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
III.3.3. Relation entre les résistances à la traction et à la compression du mortier .....	47
III.3.4. Corrélation entre la résistance à la compression et l'air occlus du mortier .....	48
III.3.5. Évaluation de la résistance mécanique du mortier à l'aide d'un essai non destructif.....	49
III.3.5.1. Vitesse du son dans le sens longitudinal.....	49
III.3.5.2. Vitesse du son dans le sens transversal.....	51
III.3.5.3. Calcul de module d'élasticité dynamique.....	53
III.3.6. Comparaison entre les résistances à la compression mesurées et calculées.....	54
III.4. Influence des fillers calcaires sur l'absorption capillaire des mortiers .....	56
III.4.1. Coefficient d'absorption capillaire .....	58
III.5. Relation entre le coefficient d'absorption et la vitesse longitudinale du son	60
III.6. Conclusion.....	61
Chapitre II. Matériaux utilisés et méthodes expérimentales.....	20



## **Introduction générale**

Les additions minérales sont de plus en plus souvent utilisées par les producteurs des bétons et des mortiers, leurs utilisations apportent une amélioration de la compacité des mortiers par double effet physico-chimiques et mécaniques des matériaux cimentaires. Cette utilisation des ajouts minéraux, qui peuvent substituer une quantité du ciment, a pour objectif de réduire la consommation énergétique nécessaire pour la fabrication du ciment, par la réduction des quantités de clinker et de l'émission du CO<sub>2</sub> dans les cimenteries. Ces réductions se traduisent par un gain économique certain et une protection de l'environnement.

Dans cette étude, nous avons donné l'intérêt à un ajout inerte qui est le filler calcaire, provenant d'une carrière des matériaux granulaires de l'entreprise nationale des granulats (ENG) qui se situe à El-Malah (W. de Aïn-Témouchent). Alors, un travail de recherche expérimental a été réalisé dans cette étude pour une valorisation de cet ajout minéral (filler calcaire) additionnée par substitution dans des mortiers ordinaires, dont l'objectif principal est d'évaluer expérimentalement l'influence de différents dosages en fillers calcaires (10, 20 et 30 %) sur le comportement physique et mécanique des mortiers ordinaires à base de différents rapports E/L (0.45, 0.55 et 0.65). Notre travail de recherche a été aussi une occasion pour comparer les résultats mécaniques obtenus par deux méthodes différentes: à l'aide des essais destructifs et non destructifs. Comme leur nom l'indique il s'agit de mesures n'endommageant pas le corps d'épreuve testé (par la mesure de la vitesse des ondes ultrasoniques).

Dans un premier chapitre de ce mémoire, nous présentons des généralités sur la fabrication du ciment et les effets de cette industrie sur l'environnement dans une première partie, ainsi que des notions sur l'hydratation des différents constituants du ciment et les matériaux cimentaires (béton et mortier) avec ajouts minéraux. Dans une deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté plus de détail sur la réactivité des fillers calcaires comme ajout dans les matériaux cimentaire, ainsi que les facteurs qui peuvent affecter cette réactivité et influencer les performances mécaniques du matériau.

Le deuxième chapitre de ce mémoire est consacré dans une première partie à une caractérisation et une identification des matériaux utilisés pour la préparation des mortiers ordinaires étudiés. Les essais expérimentaux réalisés au cours de notre travail de recherche sont présentés avec leurs modes opératoires selon les normes internationales, dont certains modes d'essais sont détaillés en Annexes. Dans la deuxième partie de ce chapitre, le début des investigations est présenté et qui est, tout d'abord, sur des pâtes normalisées par des essais de mesure de temps de prise, puis sur des mortiers par des essais de caractérisation à l'état frais et durci. Pour la caractérisation mécanique à l'état durci des mortiers étudiés et à des différents âges, des méthodes destructives et non destructives ont été utilisées. Rappelons que les modes opératoires des essais expérimentaux cités dans ce chapitre s'appuient sur des textes normatifs.

Dans un troisième chapitre, les résultats expérimentaux obtenus sont présentés et discutés. En premier lieu, les résultats de l'investigation effectuée sur nos mortiers à l'état frais, par des mesures de maniabilité et de l'air occlus, sont présentés. Alors, l'influence de différents dosages en fillers et de rapports E/L, sur le comportement rhéologique du matériau (à l'état frais) est discuté dans la première partie de ce chapitre. Par la suite, les résultats des caractéristiques mécaniques, obtenus à l'aide des essais destructifs et non destructifs (à l'aide de l'Ultrason), sont présentés et analysés dans une deuxième partie. La vitesse du son dans les deux sens (longitudinale et transversale) est discutée en fonction des résistances mécaniques obtenus. Par conséquent, les résistances mesurés et calculés (à partir des mesures de la vitesse du son) sont comparées. Dans une dernière partie de ce chapitre, des corrélations importantes sont effectuées, entre des propriétés physiques mesurées à l'état frais et durci, telles que l'air occlus et l'absorption capillaire, et des propriétés mécaniques telles que la résistance à la compression. Alors, des relation mathématiques sont élaborées dans ce chapitre suite à ces corrélation entre les différentes propriétés des mortiers étudiés à l'état frais et durci.

Finalement, des conclusions générales, obtenus à partir d'une évaluation expérimentale des fillers calcaires comme substituant du ciment dans des différents mortiers ordinaires, sont présenté en fin de ce document.

# ***Chapitre I.***

## ***Synthèse bibliographique***

### **I.1. Introduction**

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente sous la forme d'une poudre minérale fine, s'hydratant en présence d'eau. Il forme ainsi une pâte qui fait prise et qui durcit progressivement, même sous l'eau. C'est un constituant de base du béton et mortier.

Au cours des dernières années et dans le cadre de développement durable et spécialement du respect de l'environnement, les producteurs de ciment se sont intéressés à l'incorporation dans le ciment de certains sous produits industriels, susceptibles de développer des propriétés hydrauliques et également résoudre quelques problèmes écologiques.

Ce chapitre est composé de deux parties. Une première qui présente des généralités sur la fabrication du ciment et les effets de cette industrie sur l'environnement, ainsi que des notions de base sur l'hydratation des ciments et les matériaux cimentaires (béton et mortier) avec ajouts minéraux. Dans une deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté plus de détail sur la réactivité des fillers calcaires comme ajout dans les matériaux cimentaire, ainsi que les facteurs qui peuvent affecter cette réactivité et influencer sur la résistance mécanique du matériau.

## I.2. Historique de ciment

Les ciments ont un rôle essentiel dans le comportement des ouvrages en béton. Ils assurent une fonction mécanique, car ils lient le squelette granulaire. Mais ils sont aussi en grandes parties responsables de la tenue à long terme du matériau béton. Si la qualité du liant évolue dans le temps.

Les mortiers retrouvés en Égypte servaient à la fabrication de plâtre pour lier les pierres. Ces mortiers auraient ensuite été améliorés par les civilisations suivantes et particulièrement les Grecs par l'ajout de chaux à de l'argile. Ce sont véritablement les Romains qui généralisent l'usage de la chaux comme mortier [1]. Ils améliorent ce liant en y ajoutant des cendres pouzzolaniques (cendres volcaniques) et des briques pilées et obtiennent ainsi un liant hydraulique, intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Ce liant rend possible la construction de grands ouvrages tels les arènes, les amphithéâtres, les thermes ou les aqueducs, dont certains sont encore parfaitement conservés de nos jours. Le ciment ne prit son acception contemporaine qu'au XIX<sup>ème</sup> siècle :

En 1759, l'Anglais John Seaton produit un mortier aussi dur que de la pierre en mélangeant des chaux hydrauliques et des cendres volcaniques. En 1817, le Français Louis Vicat découvre les principes chimiques des ciments et définit les règles de fabrication du ciment hydraulique. Il est considéré comme l'inventeur du ciment moderne. En 1824, l'Écossais Joseph Aspdin fait breveter le ciment « Portland », obtenu à partir d'un procédé de calcination combinant la cuisson de calcaire et d'argile dans des fours alimentés au charbon. La dénomination « Portland », s'explique dans sa similarité de couleur et de dureté avec la pierre de Portland située dans le sud de l'Angleterre. En 1872, Messieurs Dufosse et Henry établirent la première usine de production de ciment Portland à Cronfestu [1]. Dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le béton moderne à base de ciment Portland devient un matériau de construction largement répandu. Par conséquent la production du ciment est toujours en augmentation dans le monde dans ce dernier siècle.

## I.3. Fabrication de ciment

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

- Préparation du cru
- Cuisson
- Broyage et conditionnement

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

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

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

### I.3.1. Le principe de la fabrication du ciment

Pour la fabrication du ciment deux matières première sont nécessaires: les calcaires et les argiles. Ces deux matières sont extraites des carrières, puis concassés, homogénéisés, portés à haute température (1450 °C) dans un four rotatif. Le produit obtenu après refroidissement rapide (la trempe) est le clinker.

Suite au chauffage du mélange d'argile et de calcaire, on provoque au début le départ de l'eau de mouillage, puis au delà de 100 °C, le départ d'eau d'avantage liée. À partir de 400 °C commence la composition en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) et en chaux (CaO), du calcaire qui est le carbonate de calcium (CaCO<sub>3</sub>). Puis à des températures plus élevées, une partie de CaO est retenu par Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> quant aux SiO<sub>2</sub> et CaO restants réagissent pour donner les silicates bi-calciques, dont une partie se transforme en silicates tricalciques où il reste encore dans la mesure du CaO non combiné [2]. La figure ci-dessous (Fig. I-1) présente le processus de fabrication du ciment par deux méthodes (par voie sèche et voie humide).

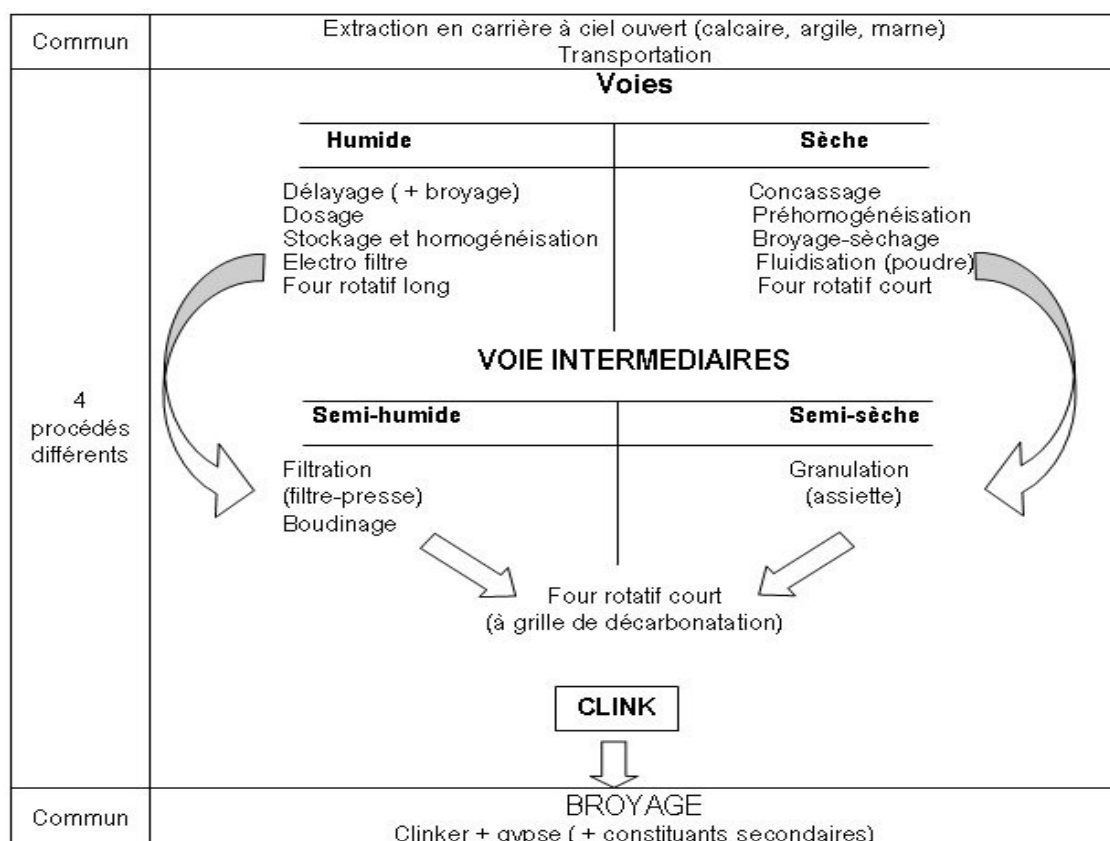


Fig.I-1. Les différents procédés pour la fabrication du ciment [3].

En Algérie, et à cause des quantités d'eau et d'énergie très importantes demandées, dans le processus de la fabrication du ciment par voie humide, on utilise alors que la voie sèche pour cette industrie.

- ***Fabrication par voie sèche***

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

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

Dans cette industrie (par voie sèche), les fours sont constitués de deux parties:

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

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

- ***La fabrication par voie sèche pose d'importants problèmes techniques***

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

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

Le problème de l'homogénéité du cru est délicat. Notons qu'il pouvait être résolu au moyen d'une pré-homogénéisation puis d'une homogénéisation [2].



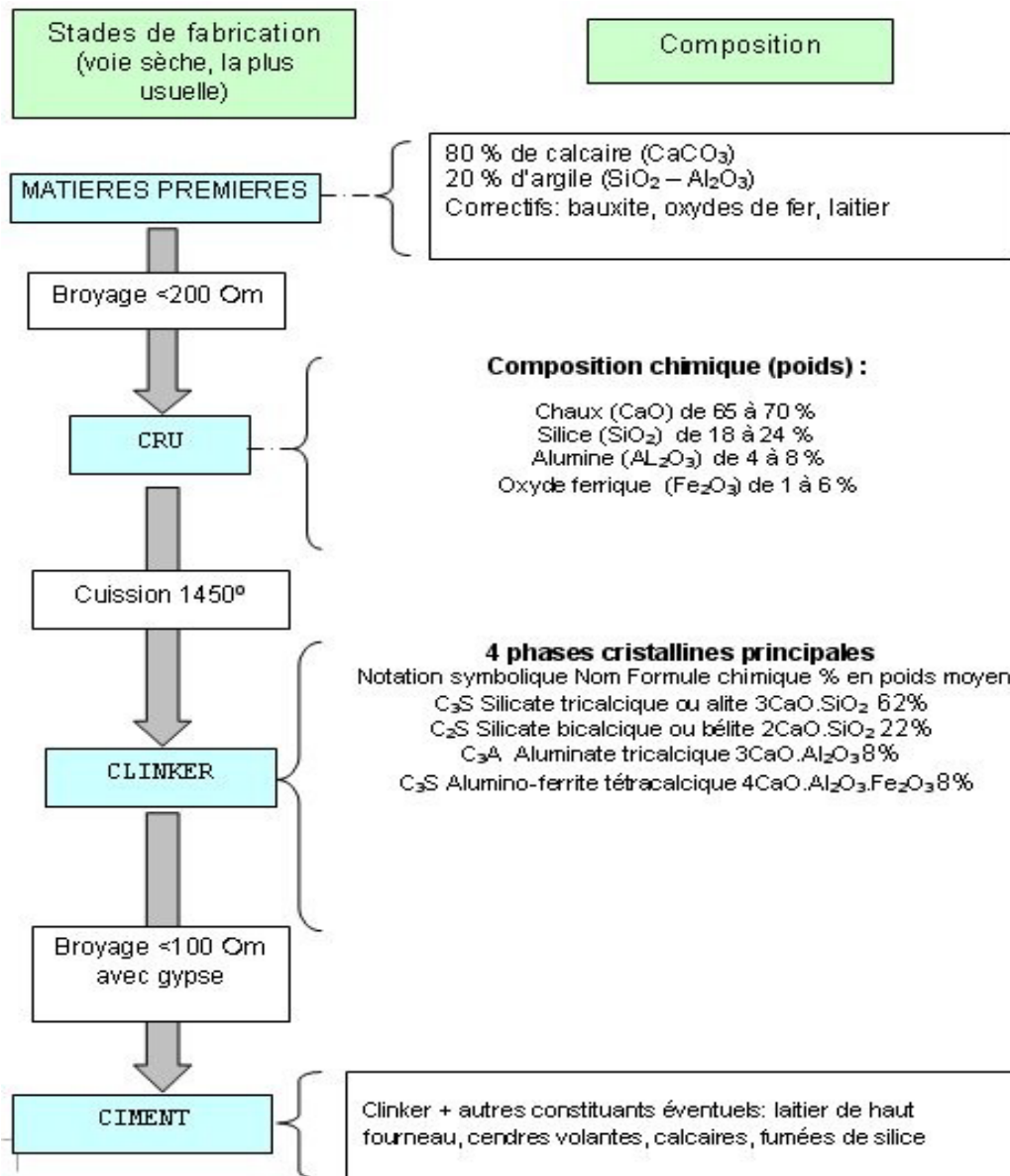


Fig. I-2. Processus de la fabrication du ciment par voie sèche [2].

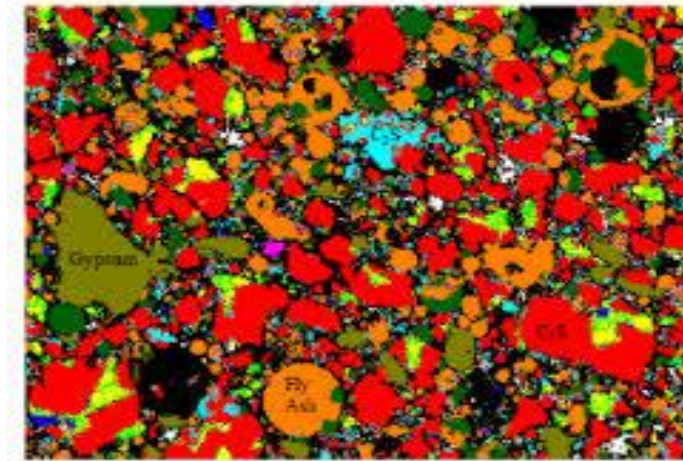
## I.3.2. Les constituants du ciment

### I.3.2.1. Le clinker

Le clinker est obtenu à la sortie des fours à la suite de la cuisson des matières premières constituants principalement de calcaire, d'argile, dosé et homogénéisé et comprenant de la chaux ( $\text{CaO}$ ) de la silice ( $\text{SiO}_2$ ) et de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Le mélange est en général constitué à l'aide de produits naturels de carrière (calcaire, argile, marne,... etc.). C'est le clinker qui, par broyage, en présence d'un peu de sulfate de chaux (gypse) jouant le rôle de régulateur, donne des Portland [4].

Les éléments simples ( $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) se combinent pour donner les constituants Minéraux suivants (voir la Fig. I-3).

- Silicate tricalcique ( $C_3S$ ) :  $3CaO.SiO_2$  (Alite).
- Silicate bicalcique ( $C_2S$ ) :  $2CaO.SiO_2$  (Belite).
- Aluminate tricalcique ( $C_3A$ ) :  $3CaO.Al_2O_3$ .
- Ferroaluminate calcique ( $C_4AF$ ):  $4CaO .Al_2O_3 .Fe_2O_3$  (Célite) [4].



**Fig. I-3.** Microphotographie d'un clinker [5].

Noir = porosité, rouge =  $C_3S$ , bleu clair =  $C_2S$ , vert =  $C_3A$ , vert foncé = sulfate de calcium, Jaune =  $K_2SO_4$  et blanc =  $CaO$

### I.3.2.2. Le gypse ( $CaSO_4$ )

Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (rayable à l'ongle) et de densité 2.3 kg/L. Quelques traces jaunes de soufre peuvent apparaître. Il est constitué en majeure partie de sulfate de calcium hydraté ( $CaSO_4, 2(H_2O)$ ). Le gypse est très pur (souvent 98 %) et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation.

L'addition de gypse au clinker a pour but de régulariser la prise du ciment, notamment de ceux qui contiennent des proportions importantes d'aluminate tricalcique. Grâce à ce gypse, la prise du ciment, c'est-à-dire le début de son durcissement, s'effectue au plus tôt une demi-heure après le début de l'hydratation. Sans gypse, la prise serait irrégulière et pourrait intervenir trop rapidement. Le gypse va se déshydrater en plâtre, éventuellement en anhydrite et modifier le comportement rhéologique du ciment [6].

## I.4. Classification des ciments en fonction de leur composition

Les ciments constitués de clinker et des constituants secondaires sont classés en fonction de leur composition, en cinq types principaux par les normes NF P 15-301 [7]. Ils sont notés CEM et numérotés de 1 à 5 en chiffres romains dans leur notation européenne (la notation française est indiquée entre parenthèse):

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

**Tab. I-1. Les différents types de ciment courants [4].**

<b>Désignations</b>	<b>Types de ciments</b>	<b>Teneur en clinker</b>	<b>Teneur de l'un de constituants suivant :</b> -Laitier pouzzolanes -Cendres calcaires -schistes -fumées de silice	<b>Teneur en constituants secondaires (filler)</b>
<b>CPA- CEM I</b>	Ciment portland	95 à 100 %		0 à 5 %
<b>CPJ-CEM II/A</b>	Ciment portland Composé	80 à 94 %	de 6 à 20 % de l'un des constituants, sauf dans les cas où le constituant est de la fumée de silice auquel la proportion est limitée à 10 %.	0 à 5 %
<b>CPJ-CEM II/B</b>		65 à 79 %	de 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5 %
<b>CHF-CEM III/A</b>	Ciment de haut fourneau	35 à 64 %	de 35 à 65 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
<b>CHF-CEM III/B</b>		20 à 34 %	de 66 à 80 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
<b>CLK-CEM III/C</b>		5 à 19 %	de 81 à 95 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
<b>CPZ-CEM IV/A</b>	Ciment pouzzolanique	65 à 90 %	de 10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %.	0 à 5 %
<b>CPZ-CEM IV/B</b>		45 à 64 %	de 36 à 55 % comme ci-dessus	0 à 5 %
<b>CLC-CEM V/A</b>	Ciment au laitier et aux cendres	40 à 64 %	de 18 à 30 % de laitier de haut fourneau de 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes.	0 à 5 %
<b>CLC-CEM V/B</b>		20 à 39 %	de 31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5 %

## I.5. Hydratation du ciment Portland

### I.5.1. Introduction

La mise en contact de l'eau et du ciment est appelée le gâchage. Durant cette étape, le ciment s'hydrate selon des réactions complexes. L'étude des mécanismes d'hydratation de chaque phase pure permet une première approche de la compréhension de l'hydratation du ciment Portland [7].

La pâte de ciment hydraté est formée par :

- Les hydrates (C-S-H,  $\text{Ca(OH)}_2$  et les sulfo-aluminates);
- Des grains de ciment non hydraté;
- Des espaces capillaires;
- Des bulles d'air [8] (voir la Fig. I-4).

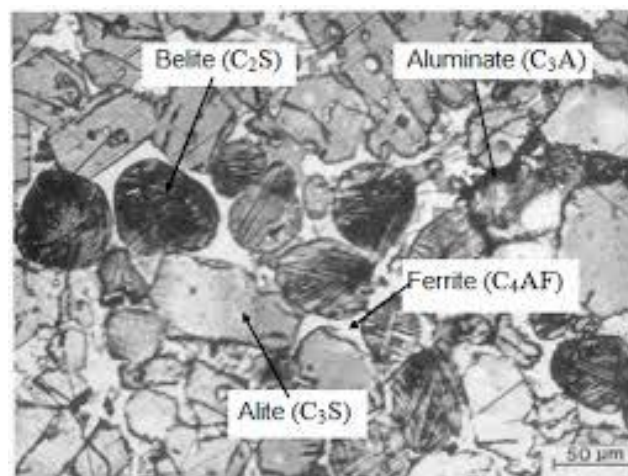


Fig. I-4. Représentation schématique de la pâte de ciment hydraté [9].

### I.5.2. Hydratation des silicates

Au contact de l'eau, les silicates tricalciques ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) et les silicates bicalciques ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) se dissolvent sous forme d'ions qui interagissent entre eux et forment des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Ces réactions sont exothermiques et peuvent servir de catalyseur à la réaction d'hydratation. Dans le cas du C<sub>2</sub>S, la cinétique d'hydratation est plus lente et la quantité de Portlandite formée est plus faible. Les C-S-H sont des composés non cristallins. Ils ont les caractéristiques d'un gel et possèdent une composition variable, L'enchevêtrement du gel C-S-H donne sa solidité au ciment : les C-S-H se développent à la surface des grains de ciment non hydratés et comblent progressivement les interstices capillaires entre les grains. Au bout de quelques heures, la couche d'hydrates qui enrobe les grains de ciment devient assez épaisse pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau vers les composants anhydres du système. L'hydratation ralentit de plus en plus, mais peut se poursuivre pendant des mois voire des années [10].

### I.5.3. Hydratation des aluminates

L'aluminate tricalcique est le composé du ciment le plus réactif avec l'eau. C'est parce que l'hydratation des aluminates est très rapide que les cimentiers ajoutent du gypse au clinker pour contrôler ces réactions. Les réactions avec les aluminates s'effectuent en plusieurs étapes :

- **Étape 1 : Formation d'ettringite (phase Aft)**

Les aluminates réagissent avec le sulfate du gypse pour former de l'ettringite TSA (trisulfoaluminate de calcium hydraté). :  $((CaO) 6 (Al_2O_3) 3(SO_3), 32H_2O)$ . Cette réaction est fortement exothermique. Une couche d'hydrates vient entourer les aluminates qui forment alors une couche protectrice autour du grain.

- **Étape 2 : Transformation de l'ettringite en monosulfate de calcium hydraté**

Lorsque le gypse est épuisé, la concentration en sulfates de la solution baisse. L'ettringite devient alors instable et se dissout pour former du monosulfate de calcium hydraté:  $((CaO) 3(Al_2O_3) (CaSO_4), 12H_2O)$ . Les réactions chimiques s'intensifient.

- **Étape 3 : Hydratation des aluminates résiduels.**

Au bout de quelques semaines, en général, l'ettringite se transforme totalement en monosulfo-aluminate. Au-delà d'un mois, les réactions se poursuivent lentement avec l'aluminate ( $C_3A$ ) et l'aluminoferrite ( $C_4AF$ ) pour former de l'aluminoferrite de calcium hydraté. Même si les séquences réactionnelles sont proches du  $C_3A$ , l'aluminoferrite tétracalcique ( $C_4AF$ ) est nettement plus lent à réagir et n'apparaît de manière significative qu'une fois que le gypse est totalement épuisé [10].

### I.5.4. Conclusion

La réaction d'hydratation du ciment combine les réactions d'hydratation des principaux composants du clinker et éventuellement, celles de ses composants secondaires. Cependant, les réactions sont plus complexes du fait des interactions chimiques et thermiques qui se produisent au cours du processus d'hydratation et du fait des impuretés présentes dans la solution solide qui influencent beaucoup l'hydratation de chaque phase.

## I.6. Les ajouts minéraux

### I.6.1. Introduction

Les ajouts cimentaires sont des matériaux minéraux que l'on mélange au ciment Portland, afin d'améliorer les propriétés du mortier ou du béton grâce à une activité hydraulique et ou Pouzzolanique. Les ajouts minéraux cimentaires typiques sont les calcaires, les cendres Volantes, le laitier granulé de haut fourneau et les fumées de silice [6].

- **Filler calcaire**

Les calcaires sont des roches sédimentaires, facilement solubles dans l'eau, composées majoritairement de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  mais aussi de carbonate de magnésium  $\text{MgCO}_3$ .

Le filler calcaire en général conduit à une augmentation de la vitesse d'hydratation du ciment, et par conséquent, à une diminution du début de prise et à une augmentation des résistances initiales.

En effet, c'est la finesse du filler contrôle ce mécanisme. Le filler calcaire réagit avec les produits d'hydratation du ciment, en se formant des carboaluminates de calcium au lieu de monosulfoaluminate, ce qui permet d'avoir d'ettringite à long terme [6].

- **Laitier de haut fourneau**

Le laitier, sous produit de la fabrication de la fonte brusquement refroidi par aspersion d'eau. C'est un matériau hydraulique lorsqu'il est activé et il se présente sous forme de nodule, dont la composition chimique comporte de l'oxyde de calcium dans de la propriété de l'ordre de 40 à 50 %, de la silice entre 25 et 35 %, de l'alumine entre 12 et 30 %, ainsi que de la magnésie et d'autres oxydes en très faible quantités. Tous ces éléments étant pratiquement les mêmes que ceux du clinker [11].

- **Cendre volante**

Elles sont les produits pulvérulents de grande finesse, provenant du dépoussiérage des gaz de combustion des centrales thermiques. On distingue Les cendres volantes siliceuses qui ont des propriétés pouzzolaniques ; Les cendres volantes calciques qui ont des propriétés hydrauliques et parfois pouzzolaniques [3].

- **Fumée de silice**

La fumée de silice est un coproduit industriel de la fabrication du silicium métallique ou de divers alliages de Ferro silicium, Elle est produite lors de la réduction du quartz très pur par du charbon dans un four à arc électrique. Elle est recueillie par filtration des gaz qui s'échappent lors de la combustion.

La fumée de silice se présente généralement sous forme de particules sphériques de très petite taille dont le diamètre moyen est de l'ordre de 0,1  $\mu\text{m}$  et composées de silice amorphe (> 85 %). Ces particules sont essentiellement vitreuses, ce qui en fait un produit hautement pouzzolanique. Elles permettent aussi de compléter la granulométrie des ciments et ainsi d'améliorer la compacité du matériau durci et donc sa résistance mécanique [7].

### **I.6.2. L'intérêt de l'utilisation des ajouts minéraux dans le génie civil**

L'utilisation d'ajouts minéraux dans les industries du ciment et du béton présente des avantages techniques, économiques et écologiques.

### **I.6.2.1. Intérêt du point de vue technique**

L'incorporation de particules très fines dans un mélange de béton permet d'améliorer sa maniabilité et de réduire le besoin en eau à une consistance donnée (sauf pour les matériaux de très grande surface active, comme les fumées de silice). Les ajouts cimentaires améliorent généralement la résistance mécanique, l'imperméabilité et la ténacité aux attaques chimiques. Enfin, parce qu'ils permettent une moindre chaleur d'hydratation des ciments mélangés, les ajouts cimentaires améliorent la résistance à la fissuration [12].

Parmi ces avantages mentionnons une plus grande ouvrabilité, une meilleure étanchéité à l'eau (l'ajout rend de béton plus compact) une réduction de la chaleur d'hydratation et des risques de fissuration sous l'effet de l'action thermique et une plus grande durabilité au milieu sulfaté ou acide [13].

### **I.6.2.2. Intérêt du point de vue économique**

L'introduction des ajouts dans la confection du ciment présente un facteur bénéfique car la consommation en clinker baisse en fonction des taux d'ajouts [14]. Le ciment Portland est le composant le plus coûteux d'un mélange de béton, puisqu'il est un matériau à forte intensité d'énergie. La plupart des matériaux "ajouts", susceptibles de remplacer le ciment dans le mortier ou béton, sont des sous-produits, et à ce titre, demandent relativement moins d'énergie, et sont beaucoup moins coûteux que le ciment Portland. Toutefois, la distance qui sépare la source des ajouts cimentaires et le coût élevé du transport qui en résulte risquent de l'emporter sur leurs avantages économiques potentiels.

De même, le manque de stockage abordable est parfois une barrière à leur utilisation dans certains marchés. Bien qu'il soit difficile à prédire, le prix des ajouts cimentaires pourrait se comparer à celui du ciment si la demande en béton ne diminuait pas, dans ce monde que menace le (CO<sub>2</sub>). Et c'est bien le gaz carbonique (dioxyde de carbone) qui pourrait finalement décider de la valeur de ces denrées [12].

### **I.6.2.3. Intérêt du point de vue écologique**

La production d'une tonne de ciment Portland libère dans l'atmosphère une quantité quasi équivalente de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>). De fait, le remplacement du ciment Portland par des ajouts cimentaires réduit d'autant les émissions de (CO<sub>2</sub>). En général l'utilisation de cendres volantes (C.V) et de fumées de silice (F.S) comme ajouts cimentaires ne demande pas un traitement à forte intensité d'énergie. Le laitier, par contre, doit être granulé et sa granulation provoque l'émission d'environ 0,07 tonne de (CO<sub>2</sub>) par tonne de laitier granulé de haut fourneau (L.G.H.F) produit. À cela, il faut ajouter les émissions de CO<sub>2</sub> causées par le transport des matériaux (ajouts) jusqu'au chantier de construction. Les études montrent que le transport (par camion et chemin de fer) d'une tonne d'ajouts cimentaires sur une distance de 1000 Km libère environ 0,022 tonne de (CO<sub>2</sub>) [12].

### **I.6.3. Rôle de l'ajout cimentaire**

### **I.6.3.1. Rôle de la granulométrie de l'ajout**

Les ajouts cimentaires finement broyés comblent les interstices granulaires inaccessibles aux grains de ciment et rendent le mélange plus fluide ce qui permet de diminuer la quantité d'eau [4].

### **I.6.3.2. Rôle pouzzolanique des ajouts cimentaires**

L'hydratation du ciment portland libère une grande quantité de chaux la suite de la réaction de l'hydratation du  $C_3S$  et  $C_2S$  (30 % de la masse du ciment). Cette chaux contribue peu où la résistance de la pâte cimentaire hydratée. Elle peut même être responsable de problème de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau ; ce lessivage augmente alors la porosité dans le béton ou le mortier, et par conséquent, il augmente la perméabilité du matériau. Les ajouts cimentaires (actifs) réagissent avec cette chaux libérée par l'hydratation du ciment pour donner des C-S-H, véritable liant contribuant à l'augmentation des résistances mécaniques du matériau. L'idéal est d'avoir une ultrafine à grande cinétique de réaction, avec des grains lisses (à défloculation facile) et à très forte activité pouzzolanique [4].

### **I.6.4. Classification des ajouts**

L'un des moyens efficaces qui existe pour augmenter la production du ciment est d'utiliser des ajouts qui peuvent être naturels ou artificiels, inertes ou actifs.

Les ajouts peuvent réagir en tant que matériau hydraulique, hydraulique latentes ou pouzzolanique, ou encore sous forme de fillers [15].

#### **I.6.4.1. Les principaux ajouts minéraux inertes**

Selon certains chercheurs, les particules de clinker de dimension supérieure à 60  $\mu\text{m}$  ne subissent pas une hydratation complète même au cours du durcissement à long terme, pour cette même raison les particules de clinker de telle dimension pourraient être remplacées par celles de matériaux inertes (NF P 18-305).

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégat. Donc, ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétique spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment portland (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau, ....etc.). Parmi ces additifs on distingue les fillers calcaires et la poussière [14].

- ***La poussière***

La poussière est une matière à particules fines, récupérée à la sortie du four, lors de son passage avec le fumé, sa finesse est comprise entre 7000 et 9000  $\text{cm}^2/\text{g}$ . le ciment composé avec la poussière a des caractéristiques mécaniques et une résistance au gel-dégel comparable à celle du ciment sans ajouts. Le temps de prise, le fluage et le retrait augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout [14].



### ▪ **Les Fillers Calcaires**

Les calcaires utilisés comme constituant du ciment et non comme constituant secondaire, c'est-à-dire lorsqu'ils représentent plus de 5 % de la masse totale du ciment, doivent présenter une proportion de carbonate de calcium  $\text{CaCO}_3$  supérieure à 75 % en masse, une teneur en argile telle que l'absorption au bleu de méthylène soit de 1,20 g au maximum pour 100 g, et une teneur en matières organiques égale à 0,5 % au maximum [11].

Les caractéristiques de filler sont très variables suivant l'âge de la roche, leur milieu de dépôt et dépendent des transformations subies au cours de la diagenèse (processus physico-chimiques et biochimiques de solidification) ou du métamorphisme (transformation par augmentation de la température et de la pression) [16]. En effet, il fut admis que ces fillers avaient principalement un effet physique de comblement de vide et d'amélioration de la porosité. De nos jours, des travaux [17] laissent entrevoir une autre efficacité provenant de réactions superficielles entre les grains de calcite et le ciment, d'où on peut tirer les constatations suivantes :

- Le calcaire réagit avec les aluminates du ciment pour former des carboaluminates de calcium hydratés.
- L'ion  $\text{CO}_3$  peut se substituer aux ions  $\text{SO}_4$  dans les sulfates hydratés.
- Le calcaire finement broyé accélère l'hydratation du ciment et plus particulièrement celle de son composé principal; le silicate tricalcique.
- Le ciment au calcaire possède une demande en eau moins importante que celle des autres ciments pouzzolaniques [16].

#### **I.6.4.2. Rôles des fillers calcaires**

Les fillers ajoutés au ciment ou au béton jouent plusieurs rôles :

- Un rôle de remplissage en substitution du ciment dans les éléments fins de la courbe Granulométrique (bétons ouvrables retenant mieux l'eau).
- Un rôle rhéologique par leur pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.
- Un rôle chimique et physique conduisant à l'accélération de l'hydratation du  $\text{C}_3\text{S}$  et du  $\text{C}_3\text{A}$  et à la formation de carboaluminates, germes de cristallisation et points d'ancrage des hydrates.
- Un rôle physique en permettant un arrangement initial différent ce qui réduit l'épaisseur entre la pâte et le granulat [6].

#### **I.6.4.3. L'action des fillers calcaire**

##### **• Action sur la porosité et la surface spécifique**

Les fillers calcaires auraient tendance à modifier la densité des C-S-H. En général, la densité des C-S-H d'échantillons de pâtes contenant du  $\text{CaCO}_3$  (corrigée en prenant en compte la présence de portlandite, de  $\text{CaCO}_3$  et de  $\text{C}_3\text{S}$  anhydre) est légèrement plus importante. Cependant, cette relation dépend également du degré d'hydratation des

matériaux. La densité d'une pâte de  $C_3S$  incorporant du carbonate de calcium est, par contre, plus faible dans le cas de l'utilisation de  $CaCO_3$ .

Des chercheurs expliquent notamment le plus important retrait d'une pâte de silicate tricalcique, par le fait que la porosité serait plus importante en présence de carbonate de calcium. À un certain degré d'hydratation, une pâte de  $C_3S$  ne contenant pas de  $CaCO_3$  a une porosité totale plus faible. Cependant, durant les sept premiers jours d'hydratation, une pâte contenant par exemple 15 % de  $CaCO_3$  peut posséder une porosité plus faible, due aux différents degrés d'hydratation comparativement à une pâte du même âge sans  $CaCO_3$ .

Le retrait de séchage serait influencé par l'addition de  $CaCO_3$ . Le retrait d'une pâte de ciment hydraté serait accru par une augmentation de la surface spécifique. Mais le retrait de séchage est influencé non seulement par la finesse et la teneur en eau, mais aussi par la nature minéralogique de l'addition [8].

- **Action sur les propriétés mécaniques**

Plusieurs travaux de recherche ont été réalisés pour relier la présence de fillers calcaires avec la résistance mécanique. Dans beaucoup, la résistance serait améliorée, ou au moins équivalente dans le cas d'addition. La majorité des chercheurs expliquent, notamment cette amélioration des propriétés mécaniques, par une densification de la matrice obtenue.

Le broyage de clinker et des fillers calcaires diminue la proportion de clinker dans le mélange et de ce fait diminue la résistance atteinte. Un broyage plus fin pourrait être réalisé pour obtenir des résistances équivalentes à un mélange sans ajout. Mais, pour des ajouts compris entre 5 et 10 %, les résistances ne sont pas significativement réduites. Et un broyage plus intense n'est pas particulièrement indiqué dans la littérature.

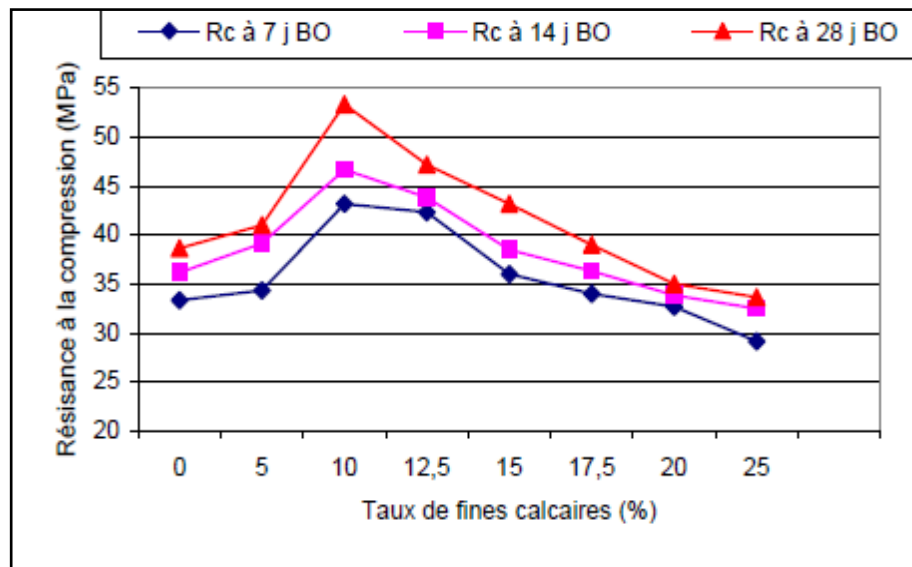
Certains auteurs, remettent en question l'effet bénéfique des fillers sur les propriétés mécaniques. L'addition de filler introduit au moment du broyage abaisserait les performances de résistance des ciments, même pour l'optimum de  $SO_3$  présent dans le ciment, quel que soit le pourcentage d'ajout ou la finesse de celle-ci. Le broyage concomitant avec celui des fillers ne favorise pas une bonne répartition de particules en taille.

IL faut souligner finalement deux éléments importants qui doivent être considérés lorsque l'on désire comparer les performances de deux matériaux : le moment du broyage ainsi que le rapport eau/liant, la répartition des tailles des particules de ciment divers à particules de fillers calcaires peut être fort différente suivant le moment du broyage.

De plus, le remplacement du ciment par les fillers induit une proportion moins importante de ciment dans le mélange. Il existe dans les papiers scientifiques des comparaisons de performances de matériaux ayant des rapports eau/ciment ou eau/liant constants ou bien encore démontrant des propriétés rhéologiques

comparables. Il faut bien entendu garder en tête les paramètres en commun des matériaux que l'on compare [8].

(DE JUAN M S, GUTIERREZ P A) ont étudié l'influence des fillers calcaires (avec différents dosages) sur l'évolution de la résistance en compression de différents bétons ordinaire (cf. Fig. I-5).



**Fig. I-5.** Variation de la résistance à la compression des bétons ordinaires en fonction du taux de calcaire.

À partir des résultats illustrés sur la Fig. I-5, il est clair que pour tous les bétons, il y a une augmentation évolutive de la résistance à la compression avec l'âge du béton et ne présentant aucune chute. Ainsi, il est observable que les bétons étudiés présentent des résistances en compression acceptables aux jeunes âges, et ils présentent des performances mécaniques satisfaisantes en compression.

On constate aussi à partir de la Fig. I-5 que l'évolution de la résistance en compression, en incorporant divers taux de filler calcaire, présente la même allure, quel que soit l'âge des éprouvettes (7, 14 et 28 jours), dans le cas des trois différents bétons ordinaires testés. On remarque aussi que l'ajout de calcaire de 5 et 10 % pour le béton ordinaire améliore la résistance à la compression des bétons étudiés à moyen et à long terme par rapport à un béton témoin (sans filler).

Les auteurs (DE JUAN M S, GUTIERREZ P A) ont notés aussi qu'après 10 % et particulièrement à 12,5 et 15 % de fines calcaires, une chute de résistance à la compression de béton ordinaire qui toutefois, reste supérieure à celle de béton ordinaire témoin. Ainsi, on remarque que l'ajout de calcaire au delà de 15 % pour le béton ordinaire, la résistance obtenue est toujours plus faible à celle du béton ordinaire sans calcaire [18].

#### I.6.4.4. L'activité du filler calcaire avec le ciment

- **Réactivité directe des fillers calcaires**

Longuet, Beuglen et Zelwer ont introduit la notion de filler inerte ou actif. Ils ont proposé d'étudier la réactivité avec le C<sub>3</sub>A comme évaluation de la réactivité hydraulique d'un filler calcaire donné.

En effet, il a été démontré que le CaCO<sub>3</sub> peut réagir avec le clinker. Des analyses de diffraction aux rayons (X) a permis de détecter la présence de carboaluminates de calcium hydratés dans des pâtes de ciment. Ces produits pourraient se former en présence ou non de gypse dans le mélange. La formation de carboaluminates de calcium hydratés est vue comme analogue à celle de l'ettringite. Il y a composition entre SO<sub>4</sub> et CO<sub>3</sub> pour réagir avec les aluminates de calcium.

La participation directe du carbonate de calcium (introduit par le biais de l'addition de fillers calcaires) à la réaction avec hydraté de formule C<sub>3</sub>A. CaCO<sub>3</sub>.11H<sub>2</sub>O. La forme C<sub>3</sub>A.3CaCO<sub>3</sub>.27H<sub>2</sub>O aurait été identifiée dans un mélange cimentaire avec CaCO<sub>3</sub> [15].

- **Réactivité indirecte des fillers calcaires**

Le gypse réagit plus vite avec l'aluminate tricalcique pour former de l'ettringite lorsque du carbonate de calcium est présent dans le mélange Cela proviendrait de la réaction du CaCO<sub>3</sub> sur la surface des grains de C<sub>3</sub>A formant une membrane plus perméable de plaquâtes hexagonales. La conversion d'ettringite en monosulfoaluminate hydraté est aussi accélérée.

Des observations au microscope électronique à balayage ont montré que les produits d'hydratation se font sur les particules de C<sub>3</sub>S et aussi de CaCO<sub>3</sub>, confortant ainsi l'idée du carbonate de calcium comme éventuel site de nucléation.

L'addition de CaCO<sub>3</sub> augmente le taux d'hydratation du silicate tricalcique. Cet effet serait d'autant plus important que la finesse des particules ajoutées diminuerait et que la quantité de carbonate de calcium ajoutée serait accrue.

Le carbonate de calcium accélérerait l'hydratation du silicate tricalcique comme le dichlorure de calcium. Mais sans toutefois diminuer la période d'induction, l'effet accélérateur est particulièrement marqué pour une teneur optimale en CaCO<sub>3</sub> [15].

Après cet optimum, il pourrait bloquer la dissolution et la cristallisation de produits d'hydratation. Cela pourrait provenir du fait que des particules de CaCO<sub>3</sub> seraient incorporées dans la phase des C-S-H. Plus la quantité de CaCO<sub>3</sub> incorporée serait grande, plus cette partie prise par les C-S-H serait importante, du moins jusqu'à une valeur de 25% [15].

## **I.7. Conclusion**

Depuis des décennies, le ciment portland a été toujours le matériau de construction le plus populaire dans le monde. Notre synthèse bibliographique a montré que l'industrie cimentaire nécessite une quantité d'énergie très importante pour la fabrication du ciment Portland. Elle cause aussi un dégagement très élevés du CO<sub>2</sub> et de la poussière causant la pollution de l'environnement. L'incorporation des ajouts minéraux actifs et inertes dans les bétons et les mortiers permet d'améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques de ces derniers. Dans ce qui suit, nous allons étudier l'influence de l'incorporation des fillers calcaires dans des mortiers ordinaires, comme substitution partielle du ciment, sur les propriétés physiques et le comportement mécanique des mortiers ordinaires.

## ***Chapitre II.***

### ***Matériaux utilisés et méthodes expérimentales***

#### **II.1. Introduction**

Les objectifs de cette étude expérimentale visent à réaliser des mortiers ordinaires à base des fillers calcaires en caractérisant leurs performances physiques et mécaniques.

Le mortier ordinaire est constitué de ciment, de sable (un sable combiné), d'eau et d'ajouts (fillers Calcaires). En effet, le travail que nous présentons met en évidence l'utilisation des fillers calcaires de l'entreprise national des granulats (ENG) d'Al-Malah (Wilaya d'Aïn-Témouchent), dans le but de son exploitation en substitution partielle au ciment.

Les comportements physique et mécanique du mortier, à l'état frais ou durci, sont le résultat d'une interaction complexe entre ses divers constituants, c'est la raison pour laquelle, des essais de caractérisation et d'identification des matériaux entrant dans les compositions des mortiers étudiés sont décrits dans ce chapitre. Les essais expérimentaux réalisés au cours de notre travail de recherche (présentés ci-dessous dans un organigramme) sont relatifs à l'étude des propriétés des mortiers ordinaires, dont certains modes opératoires ont été détaillés dans ce chapitre.

Le début des investigations a été sur pâtes normalisées par des essais de mesure de temps de prise, puis sur des mortiers par des essais de caractérisation à l'état frais et durci. Pour la caractérisation mécanique à l'état durci des mortiers étudiés et à des différents âges, des méthodes destructives et non destructives ont été utilisées. Les modes opératoires des essais expérimentaux cités dans ce chapitre s'appuient sur des textes normatifs.

## II.2. Identification des matériaux

La caractérisation des matériaux de construction nécessite la connaissance de la nature de ses composants. Par ailleurs, la détermination des dosages optimaux, ainsi que l'illustration des certains interprétation ne pourraient être possible que si les différents constituant sont bien caractérisés.

### II.2.1. Le ciment

Un seul type de ciment a été utilisé pour les différentes compositions étudiées: un ciment CEM II/A 42,5 de la cimenterie de béni-Saf (W. de Aïn-Témouchent). C'est un ciment Portland composé fabriqué conformément à la norme NA 443-200.

Ce ciment composé (CEM II/A) est le plus utilisé dans le domaine de la construction dans toute la région d'ouest. Les compositions chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le **Tab. II-1** et leurs caractéristiques physiques sont consignées sur le **Tab. II-2**. Les analyses chimiques et les compositions minéralogiques ont été réalisées dans la société des ciments de béni-saf S.C.I.B.S (à Aïn-Témouchent) et l'étude des caractéristiques physico-mécaniques des ciments a été conduite au laboratoire de génie civil à l'institut de Technologie au Centre Universitaire de Aïn-Témouchent.

**Tab. II-1.** Compositions chimiques et minéralogiques des deux ciments testes.

<i>Composition chimique</i>		<i>Composition Bogue</i>	
<i>Composants</i>	<i>Quantité (%)</i>	<i>Composants</i>	<i>Quantité (%)</i>
SiO <sub>2</sub>	28.14	C <sub>3</sub> S	33.50
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.56	C <sub>2</sub> S	38.60
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.20	C <sub>3</sub> A	9.75
CaO	56.00	C <sub>4</sub> AF	10.85
MgO	1.05	Gypse	7.3
SO <sub>3</sub>	2.00		
CaO libre	0.69		
Perte au feu	1.38		
Chlorures	0.03		
Insolubles	9.59		

Le ciment utilisé dans ce travail expérimental (CEM II/A 42.5) se caractérise par une plus faible teneur en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et par conséquent a une faible teneur en C<sub>3</sub>A, ce qui conduit à un temps de prise (début et fin de prise) légèrement retardé (cf. **Tab. II-1** et **II-2**).

Les masses volumiques (apparente et absolue) de ciment utilise, déterminées selon la norme NF P 18-558, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme NA 231 (Norme Algérienne, 1992) [N.A. 92], compris entre 0.900 – 1.100 g/cm<sup>3</sup> pour la masse volumique apparente et 2.900 – 3.150 g/cm<sup>3</sup> pour la masse volumique absolue (cf. **Tab. II-2**).

**Tab. II-2.** Caractéristiques physiques du ciment Portland CEM II/A 42,5

		<b>Ciment CEM II/A 42.5</b>
<b>Ciment anhydre</b>	Masse volumique absolue (g/cm <sup>3</sup> )	3.011
	Masse volumique apparente lâche (g/cm <sup>3</sup> )	1.092
	Masse volumique apparente compacte (g/cm <sup>3</sup> )	1.714
	Surface spécifique Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	2765
<b>Pâte du ciment</b>	Consistance (%)	28
	Début de prise (heure)	2 H 45 min
	Fin de prise (heure)	6 H 15 min

Ci-dessous quelques modes opératoires sont présentés correspondant à la détermination des caractéristiques physiques du ciment tel que la masse volumique absolue et la surface spécifique Blaine de ciment. Plus de détails sont donnés en Annexes sur les mesures de la consistance, des temps de prise et de la masse volumique absolue des poudres.

▪ **Détermination de la surface spécifique Blaine du ciment selon la norme NF EN 196-6**

La finesse Blaine permet de mesurer la finesse de mouture d'un ciment. Elle est caractérisée par la surface spécifique ou surface développée totale de tous les grains contenus dans un gramme de ciment (norme NF EN 196-6). Elle s'exprime en cm<sup>2</sup>/g. Suivant le type de ciment, cette valeur est généralement comprise entre 2800 et 5000 cm<sup>2</sup>/g.

L'essai a pour but de calculer le début d'air susceptible de passer à travers la poudre. La surface massique du ciment étudié n'est pas mesurée directement, mais par comparaison avec un ciment référence dont la surface massique est connue. Il s'agit de faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment. Toutes choses étant égales par ailleurs, plus la surface massique de cette poudre est importante, plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long.

### II.2.2. Les granulats

Dans ce travail de recherche, les agrégats utilisés sont deux sables de différentes natures et de différents calibres; (un sable concassé (0-4 mm) de nature calcaire issus de



**Fig. II-1.** Essai de la détermination de la surface spécifique Blaine à l'aide d'un dispositif automatique (Labo. de G. Civil - CUAT).



concassage d'un calcaire dur dont la carrière se situ de sidi-Ali Benyoub à la wilaya de Sidi-Belabès (voir le **Tab. II-3**) et un sable de mer (sable fin (0-1 mm)) qui provient de la sablière de Terga (Wilaya de Ain-Temouchent) qui est un sable roulé de nature siliceuse. Ce choix a été déterminé par le fait que ces deux sables sont les plus utilisés dans la région nord ouest Algérien pour la fabrication des mortiers ordinaires.

Par ailleurs, afin d'avoir un sable dont la courbe granulométrique se situe à l'intérieur du fuseau normalisé pour un bon mortier, nous avons procédé à une correction de la granulométrie en combinant 40 % de sable fin (sable 0-1 mm) avec 60 % de sable de carrière (0-4 mm). Les résultats obtenus de la granulométrie (voir la **Fig. II-5**) montrent que la courbe granulométrique du sable combiné s'insère presque parfaitement dans le fuseau idéal pour un bon mortier ordinaire. Des travaux antérieurs [35] ont montré le même résultat (l'insertion dans le fuseau idéal) en respectant les mêmes pourcentages indiqués ci-dessus.



**Fig. II-2.** Sable de mer (0-1 mm).

**Fig. II-3.** Sable de carrière (0-4 mm).

Les analyses chimiques du sable fin (de mer) et du sable concassé sont présentés ci-dessous dans les **Tab. II-3** et **II-4** respectivement.

**Tab. II-3.** Analyses chimiques du sable de mer (0-1 mm)

<b>Composants</b>	<b>Quantité (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	70.15
CaO	16.21
MgO	0.14
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.41
SO <sub>3</sub>	0.00
CL	0.00
(M.O)	0.00
CO <sub>2</sub>	12.80
H <sub>2</sub> O	0.58
La Perte Au Feu	13.38
Les Carbonates	29.09

Le pourcentage important de la silice (70.15 %) dans le sable fin (de mer) (cf. **Tab. II-3**) indique que ce sable est de nature siliceuse. Nous avons constaté aussi, à partir des analyses chimiques du sable concassé (de carrière), qu'il est de nature calcaire (cf. **Tab. II-4**) puisque le pourcentage de  $\text{CaCO}_3$  est de 79,09 %.

**Tab. II-4.** Analyses chimiques du sable concassé (0-4 mm)

<b>Composants</b>	<b>Quantité (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	19.86
CaO	43.94
MgO	0.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.44
SO <sub>3</sub>	0.00
CL	0.00
CO <sub>2</sub>	34.80
H <sub>2</sub> O	0.88
La Perte Au Feu	35.68
Les Carbonates	79.09

Les propriétés physiques des différents sables sont présentées dans le **Tab. II-5**. Tous les essais de laboratoire effectués dans cette partie du programme expérimental ont été conduits, selon les normes internationales, dans le laboratoire de génie civil au Centre Universitaire de Aïn-Témouchent.

**Tab. II-5.** Propriétés physiques des sables grossier (calcaires) et fin (siliceux).

	<b>Sable calcaire (0-4 mm)</b>	<b>Sable siliceux (0-1 mm)</b>
Masse volumique apparente lâche (kg/m <sup>3</sup> )	1450	1470
Masse volumique apparente compacte (kg/m <sup>3</sup> )	1696	1665
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2680	2610
Equivalent de sable visuel (%)	64	94
Equivalent de sable à piston (%)	60	91
Module de finesse	3.6	0.83
Teneur en fines (%)	10	3

Dans ce qui suit, plus de détails sont donnés sur plusieurs caractéristiques physiques des sables utilisés dans cette étude, telles que l'analyse granulométrique, le module de finesse,...etc. dont plusieurs modes opératoires de ces essais sont présentés en Annexes

dans ce document. Les caractéristiques physiques de sable combiné (60 % de sable grossier (0-4 mm) + 40 % de sable fin) sont aussi présentées ci-dessous (cf. **Tab. II-9**).

▪ **Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique effectuée selon la norme NF P 18-560 a permis, à l'aide de différents tamis, de déterminer précisément la composition du matériau étudié afin d'en déduire ses caractéristiques mécaniques. Elle permet également de vérifier un matériau élaboré en carrière, en comparant sa courbe granulométrique avec le fuseau de prescription correspondant.

Cette analyse se fait en laboratoire et l'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamisât sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

**Tab. II-6.** Analyse granulométrique de sable de mer.

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus partiel (g)</b>	<b>Refus cumulés (g)</b>	<b>Refus cumulés (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
2	0	0	0	100
1	4.9	4.9	0.49	99.51
0.5	31.6	36.5	3.65	96.35
0.250	476.3	512.8	51.28	48.72
0.125	332.6	845.4	84.54	15.46
0.08	98.9	944.3	94.43	5.57
0.0063	45.8	999.1	99.01	0.99
Le fond	5.3	995.4	99.54	0.46

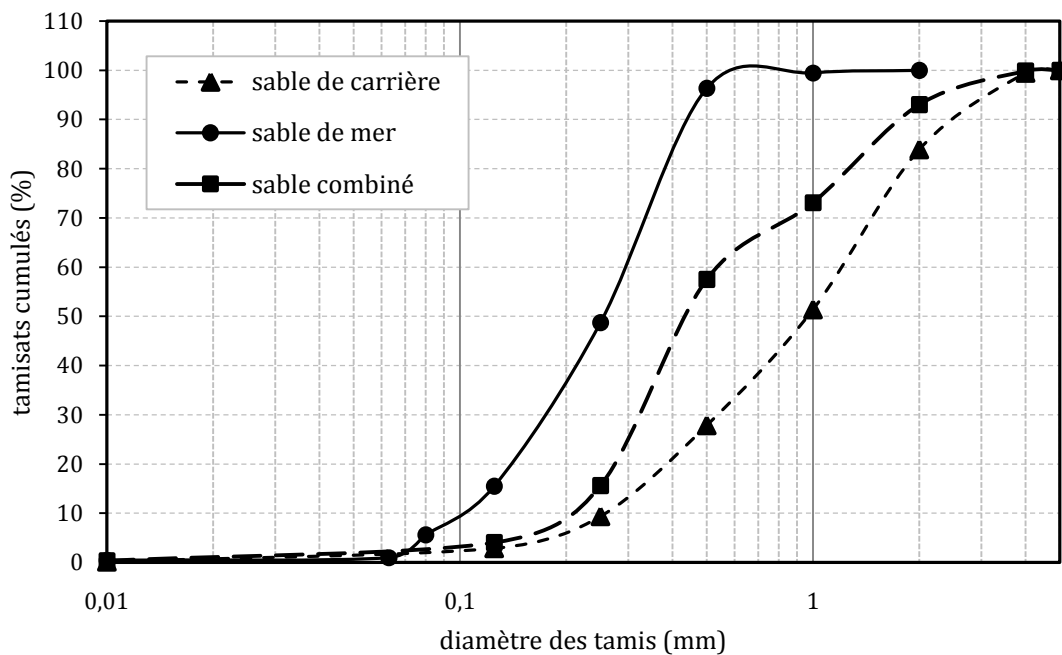
**Tab. II-7.** Analyse granulométrique de sable de carrière.

<b>Tamis (mm)</b>	<b>Refus partiel (g)</b>	<b>Refus cumulés (g)</b>	<b>Refus cumulés (%)</b>	<b>Tamisât cumulés (%)</b>
5	0	0	0	100
4	4.9	4.9	0.49	99.51
2	156.1	161	16.1	83.9
1	325.1	486.1	48.61	51.39
0.5	235.8	721.9	72.19	27.81
0.25	184.7	906.6	90.66	9.34
0.125	65.2	971.8	97.18	2.82
Le fond	27	998.8	99.88	0.12

**Tab. II-8.** Analyse granulométrique de sable combiné.

Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât cumulés (%)
5	0	0	0	100
4	1.5	1.5	0.15	99.85
2	68	69.5	6.95	93.05
1	198.9	268.4	26.84	73.16
0.5	156.8	425.2	42.52	57.48
0.25	419	844.2	84.42	15.58
0.125	115.8	960	96	4
Le fond	37.7	997.7	99.7	0.3

La Fig. II-4 présente les courbes granulométrique des sables de mer (fin), de carrière (gros) ainsi que du sable combiné.

**Fig. II-4.** Courbe granulométrique des sables utilisés

#### ▪ Le Module de finesse

Le module de finesse est un coefficient permettant de caractériser l'importance des éléments fins dans un granulat. Il est égal au 1/100 de la somme des refus cumulés de pourcentages sur les tamis de la série suivante : 5 - 4 - 2 - 1 - 0.5 - 0.25 - 0.125 mm.

En effet, le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins. Notons que pour le sable fin (0-1 mm) le module de finesse obtenu est égal à 0.83, alors, la combinaison de 40 % de ce sable de mer avec 60 % de sable concassé (0-4 mm), qui a un module de finesse de 3.6 (voir le **Tab. II-5**), a permis d'obtenir un module de

finesse de sable combiné égal à 2,54. Cette valeur correspond parfaitement pour la confection d'un mortier normalisé selon la norme NF P 18 560.

▪ **Équivalent de sable**

Nous rappelons que cet essai, est utilisé de manière courante pour évalué la propreté des sables utilisés pour la composition des matériaux cimentaires. L'essai consiste, alors, à séparer les particules fines contenues dans le sable des éléments sableux plus grossiers, une procédure normalisée permet de définir un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté du sable .Le mode opératoire de cet essai est présenté en *Annexe A*.

Nous rappelons que les valeurs des équivalents de sable grossier (0-4 mm), visuel et à piston, sont respectivement égales à 64 et 60 %, alors que pour le sable fin (0-1 mm) elles sont égales à 94 et 91 %. Cependant, pour le sable combiné utilisé pour la fabrication des mortiers étudiés dans ce travail de recherche (40 % de sable 0-1 mm + 60 % de sable 0-4 mm), la mesure des équivalents de sable, visuel et à piston, donnent les valeurs de 75 et 71 % respectivement. Ce résultat correspond presque parfaitement à la valeur de l'équivalent de sable proposée par les textes normatifs qui est d'environ 75 % pour la confection d'un bon mortier de construction.

Les caractéristiques physiques de sable combiné utilisé dans cette étude sont reportées dans le **Tab. II-9**.

**Tab. II-9.** *Caractéristiques physiques de sable combiné.*

	<b>Sable combiné</b> (60 % S. concassé + 40 % S. de mer)
Masse volumique apparente lâche (kg/m <sup>3</sup> )	1587
Masse volumique apparente compacte (kg/m <sup>3</sup> )	1810
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2568
Equivalent de sable visuel (%)	75
Equivalent de sable à piston (%)	71
Module de finesse	2,54
Teneur en fines (%)	7,3

**II.2.3. L'eau de gâchage**

Pour la confection des mortiers nous avons utilisé l'eau potable du robinet. Cette eau est potable et propre à la consommation. De plus, elle renferme toutes les prescriptions de la norme NF P 18-303.

L'analyse chimique de l'eau utilisée pour la confection de nos mortiers étudiés est présentée sur le **Tab. II-10**.

**Tab. II-10.** Analyses chimiques L'eau de gâchage.

<b>Composants</b>	<b>Quantités (mg/L)</b>	<b>Quantités (Meq /L)</b>
Ca	52.9	2.64
Mg	32.07	2.63
Na	-	-
K	-	-
Balance Cations	84.97	5.27
Cl	71.00	2.00
SO <sub>4</sub>	115.19	2.40
CO <sub>3</sub>	Néant	Néant
HCO <sub>3</sub>	170.85	2.80
Balance Anions	357.04	7.20

#### II.2.4. Les fillers calcaires

Les fillers calcaires utilisés proviennent de la carrière d'El-Maleh de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG) (W. de Aïn-Témouchent).



**Fig. II-5.** Fillers calcaires.

Les caractéristiques physiques de filler calcaire sont présentées dans le tableau ci-dessous (**Tab. II-11**).

**Tab. II-11.** Caractéristiques physiques de filler calcaire.

	<b>Filler calcaire</b>
Masse volumique apparente lâche (kg/m <sup>3</sup> )	1110
Masse volumique apparente compacte (kg/m <sup>3</sup> )	1280
Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2640
Surface spécifique Blaine	3285

**Tab. II-12.** Analyses chimiques de fillers calcaire.

Composants	Carbonates	Sulfates	Chlorures	Matière organique
Valeurs (%)	59.18	Néant	0.35	0.45

### II.3. Formulation des mortiers

Les essais sont effectués sur un mortier normalisé ayant une composition standard de ciment, sable et eau. À partir de ce mortier de base, on a substitué une partie de ciment par des proportions variables de 0 %, 10 %, 20 % et 30 % de fillers calcaires.

Les différents mortiers sont confectionnés avec un rapport E/L variant de 0.45, 0.55, 0.65 (voir le **Tab. II-14**). La préparation des mortiers s'est déroulée dans les conditions atmosphériques du laboratoire à une température ambiante de  $20 \pm 2$  °C. Le mortier témoin, confectionné selon la norme NF EN 196-1, est constitué, en masse, d'une partie de ciment (450 g), de 3 parties de sable (1350 g) et d'une demi-partie d'eau (225g). Les mortiers avec additions sont obtenus dans les mêmes conditions en remplaçant une fraction massique (taux de substitution) de ciment par des fillers calcaires, les quantités de sable, d'eau restant inchangées.

Pour la préparation des mortiers nous avons utilisé la même procédure (mode opératoire) pour tous les mélanges confectionnés. Les étapes du malaxage sont indiquées sur le tableau ci-dessous (cf. **Tab. II-13**).



**Fig. II-6.** Appareil de malaxage.

**Tab. II-13.** Opération pour la préparation des mortiers.

Opérations	Introdu- ction de l'eau	Introdu- ction de ciment		Introdu- ction de sable		Raclage de la cuve		
<b>Durée des opérations</b>			30 s	30 s	30 s	15 s	1 min 15 s	60 s
<b>Etat du malaxeur</b>	Arrête		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrête		Vitesse rapide

Afin de répondre à notre objectif, 12 séries de mortiers ont été confectionnées en faisant varier le dosage en fillers calcaires (FC = 0, 10, 20 et 30 %), comme substituant du ciment dans les mortiers étudiés, ainsi que le rapport E/L qui varie de 0.45, 0.55 et 0.65.

Les compositions des différents mortiers étudiés sont présentées dans le tableau ci-dessous (cf. **Tab. II-14**).

**Tab. II-14.** Les différentes compositions des mortiers étudiés.

<i>Composition</i>	<i>E/L</i>	<i>Ciment (g)</i>	<i>FC (g)</i>	<i>Eau (g)</i>	<i>Sable de mer (g)</i>	<i>Sable concassé (g)</i>
M01	0.45	450	0	202,5	450	810
M02	0.45	405	45	202.5	450	810
M03	0.45	360	90	202.5	450	810
M04	0.45	315	135	202.5	450	810
M05	0.55	450	0	247,5	450	810
M06	0.55	405	45	247.5	450	810
M07	0.55	360	90	247.5	450	810
M08	0.55	315	135	247.5	450	810
M09	0.65	450	0	292,5	450	810
M10	0.65	405	45	292.5	450	810
M11	0.65	360	90	292.5	450	810
M12	0.65	315	135	292.5	450	810

#### II.4. Essais à l'état frais des mortiers

Les premiers essais sur mortiers frais que nous présentons, sont des essais classiques qui s'effectuent traditionnellement sur des mortiers. Aucune modification n'a été effectuée pour les appliquer aux mortiers. Les essais réalisés sur mortier sont :

- **Maniabilité**

La maniabilité des mortiers est mesurée au maniabilimètre LCL à mortier, conformément à la norme NF P 18-437. Cette grandeur est caractérisée par la mesure d'écoulement qui est autant plus grand que la consistance du mortier est épaisse.

Comme l'atteste les résultats de maniabilité, aucun mortier n'a posé de difficulté de mise en place lors de la confection.

C'est une mesure sont très utiles pour apprécier l'influence des fillers calcaires ainsi que le rapport E/L sur la fluidité d'un mortier. Le schéma ci-dessous présente le principe de l'essai de maniabilité du mortier à l'aide de perméabilimètre LCL.



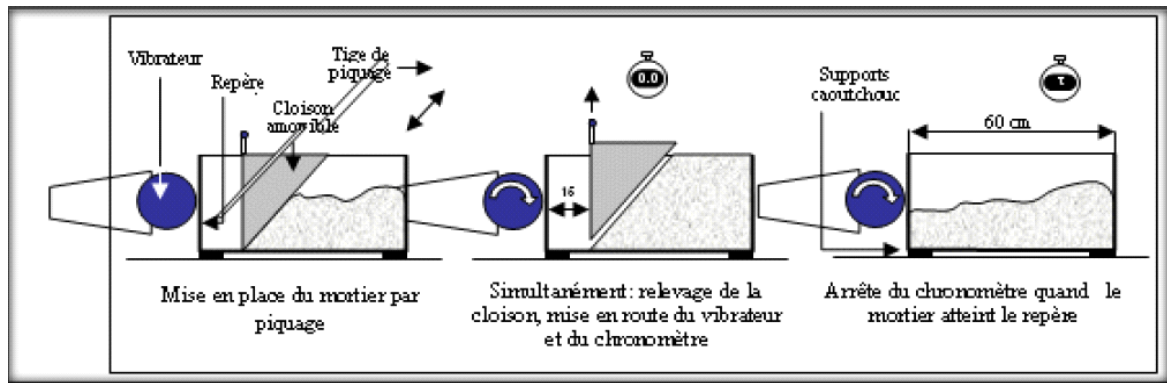


Fig. II-7. Principe de fonctionnement du maniabilimètre.

#### ▪ L'air occlus

Nous avons mesuré la quantité d'air occlus dans le mortier à l'aide d'un aéromètre. L'air occlus est dû au volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans le mortier après la mise en œuvre (remplissage des moules, vibration). Celui-ci dépend du mélange de granulats, de l'ouvrabilité du mortier et enfin de l'énergie de serrage développée lors de la mise en œuvre (l'énergie de vibration). Pour chaque mortier, avec différents dosages en filler calcaire et différents rapport E/L, nous avons mesuré le pourcentage d'air occlus.



Fig. II-8. Appareil de mesure de la teneur en air occlus.

### II.5. Préparation des éprouvettes

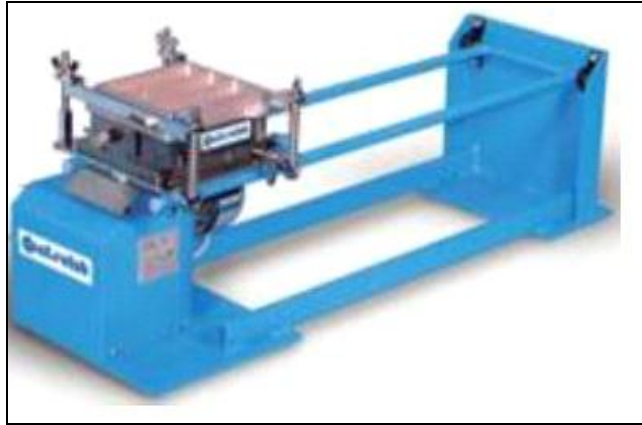
Les échantillons d'essai ont été confectionnés selon la norme NF P 15-403 dans des moules prismatiques (40 x 40 x 160) mm<sup>3</sup>.

Dans le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit d'abord la première des deux couches de mortier. Cette couche est étalée uniformément en utilisant la grande spatule, puis serrée par 60 chocs. Ensuite la deuxième couche est alors introduite, nivelée à l'aide de la spatule et serrée à nouveau par 60 chocs. Le moule est enlevé par la suite de la table à choc, et on enlève l'excédent de mortier par arasage. La surface des éprouvettes est ensuite lissée à l'aide d'une spatule.

Après le démoulage, les échantillons ont été laissés pendant 24 heures pour sécher relativement à l'air libre de laboratoire. Les échantillons (40 x 40 x 160) mm ont été conservés par la suite dans de l'eau à une température ambiante d'environ 20 °C selon la norme NF P 15-402.



**Fig. II-9.** Moule d'éprouvettes Prismatiques (40x40x160) mm.



**Fig. II-10.** Appareil de choc.



**Fig. II-11.** Conservation des éprouvettes dans l'eau à  $20 \pm 2$  °C.

## II.6. Les essais destructifs

La résistance mécanique des mortiers étudiés a été déterminée par des essais destructifs en flexion et en compression des éprouvettes ( $4 \times 4 \times 16$ ) cm<sup>3</sup> à l'âge de (7, 14, 28 et 60 Jours), de façon à observer l'évolution progressive des performances.

Chaque éprouvette donne un résultat de flexion et deux résultats de compression selon la norme EN 196-1 . Donc, chaque résistance à la compression correspond à la moyenne de six mesures, puisque les résultats obtenus à différents échéances représentent la moyenne de trois échantillons.

### II.6.1. Résistance à la traction par flexion

L'essai de traction par flexion est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé sur des mortiers. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à des efforts de tension de sens opposés sur trois points de sens longitudinal de l'éprouvette. La **Fig. II-12** présente un schéma descriptif du principe de l'essai de la flexion à trois points d'une éprouvette du mortier.

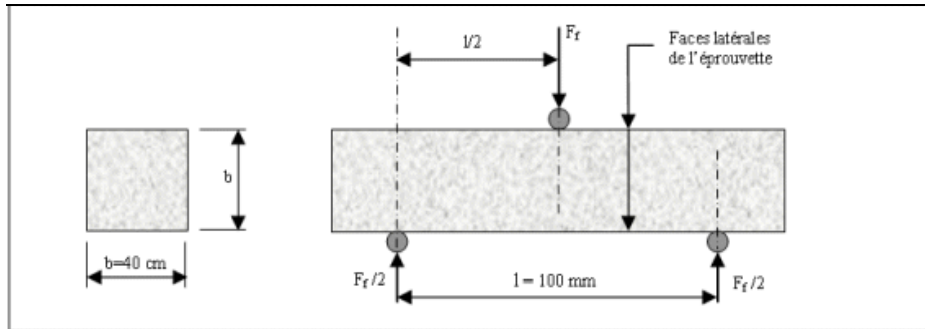


Fig. II-12. Dispositif pour l'essai de la résistance à la traction par flexion du mortier.

### II.6.2. Résistance à la compression

C'est une méthode pour caractériser le comportement d'un matériau soumis à une charge d'écrasement. L'éprouvette est comprimée, puis la résistance à la compression est enregistrée. Un schéma représentant le principe de l'essai d'écrasement pour un échantillon du mortier est illustré ci-dessous sur la Fig. II-13.

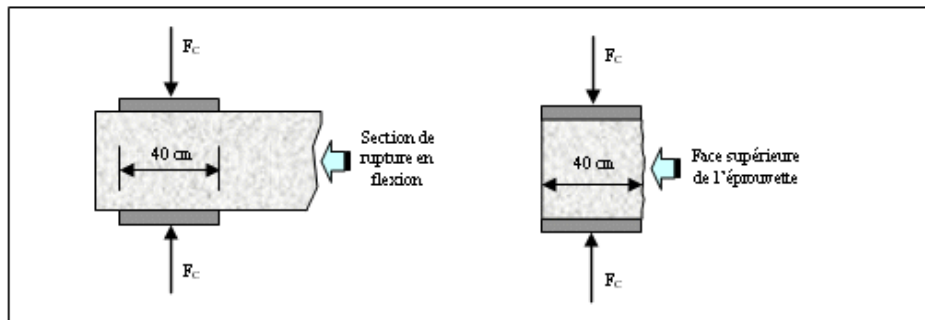


Fig. II-13. Dispositif pour l'essai de la résistance à la compression du mortier.

La figure ci-dessous (Fig. II-14) montre la presse hydraulique utilisé dans notre compagne expérimental (laboratoire de génie civil - CUAT) pour la mesure des résistances mécaniques de nos mortiers étudiés.



Fig. II-14. Ecrasement des éprouvettes (4x4x16) cm<sup>3</sup> à l'aide d'une presse hydraulique de 250kN (Laboratoire de G. Civil - CUAT).

## II.7. Les essais non destructifs

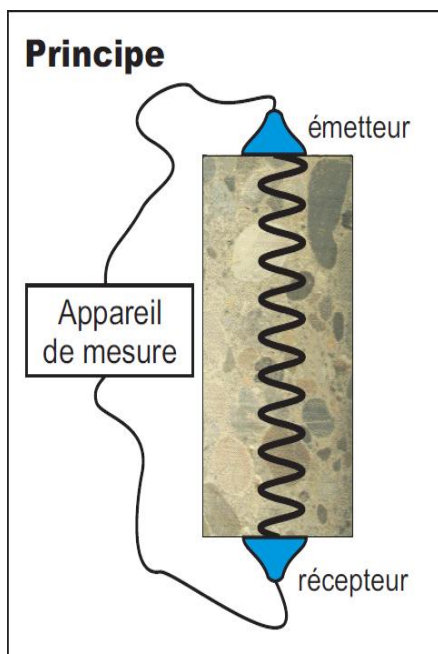
Les essais non destructifs consistent à prendre des mesures qui n'endommagent pas les constructions. Nos seulement réalisables sur des éprouvettes du matériau au laboratoire, mais ils représentent aussi des méthodes de reconnaissance in-situ, qui sont appliquées couramment aux structures de bâtiments.

Les essais non destructifs peuvent jouer un rôle exceptionnel dans la garantie de la qualité du matériau cimentaire (béton ou mortier), ainsi que dans le développement ultérieur de la technologie de construction. 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 matériau testé dans le temps.

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 mécanique, l'homogénéité, la porosité, la durabilité,...etc.

### II.7.1. Essai de propagation des ondes ultrasonique

La méthode de la vitesse d'impulsion ultrasonique a été utilisée avec succès pour la détermination de l'homogénéité des matériaux cimentaires (principalement du béton), de la présence de fissures ou de vides, les changements de propriétés dans le temps et pour la détermination des caractéristiques physiques et dynamiques. Par ailleurs, il est également possible d'estimer la résistance du béton en laboratoire aussi bien que sur site.



**Fig. II-15.** Schéma simplifié de la mesure de la vitesse de son.



**Fig. II-16.** Appareil de mesure de la Vitesse de son.

Cet essai est une méthode véritablement non destructive, car elle est basée sur des ondes ultrasoniques ayant aucun dommage à l'élément examiné du béton. Un spécimen peut être examiné à plusieurs reprises au même endroit, ce qui peut s'avérer utile pour surveiller les changements structurels subis à l'intérieur du béton sur une longue durée.

Le principe de cet essai est de déterminer de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques longitudinales et transversales dans un élément du matériau durci (voir les **Figs. II-15** et **II-16**). Il consiste à mesurer le temps de propagation entre deux points désignés sur la surface de l'objet à testé. En sachant la longueur du parcours entre ces deux points, la vitesse d'impulsion peut donc être déterminée. Une vitesse élevée de propagation des impulsions indique généralement un matériau (un mortier par exemple) de bonne qualité.

Pour estimer le module d'élasticité, les mesures par ultrasons sont recommandées. La vitesse de propagation de l'onde ultrasonore dans un mortier, dépend du module d'élasticité du mortier et de sa densité. Le module d'élasticité est déterminé selon la vitesse du son et la masse volumique du corps d'épreuve testé.

– Le module d'élasticité dynamique peut être déterminé par l'équation suivante:

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

Où:  $\gamma$  est la masse volumique du mortier (expérimentale),  $\nu = 0,2$  (coefficient de Poisson), et  $V$  est la vitesse du son [km/s].

### II.7.2. Essai de l'absorption capillaire

L'absorption est un phénomène physique intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires.

La méthode repose sur la mesure directe de l'ascension capillaire d'un liquide. On place la face plane d'un échantillon légèrement immergée à la surface de l'eau. La hauteur d'ascension est à peu près proportionnelle à la racine carrée du temps.

Cette méthode a l'avantage d'être indépendante de la composition granulométrique, en particulier de la proportion granulats/pâte de ciment. Elle est aussi la seule qui offre la possibilité d'une différenciation locale quasi ponctuelle de la capillarité.

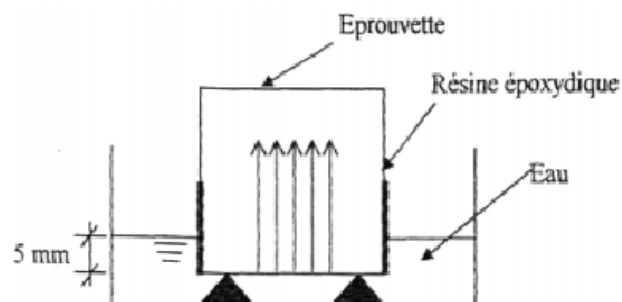


Fig. II-17. Schéma du principe de l'essai d'absorption.

▪ **Les étapes de l'essai**

L'échantillon doit tout d'abord être séché pendant 24h à 85 °C dans une étuve, ce qui élimine une grande quantité de l'eau des pores à l'exception de celle des pores du gel.



**Fig. II-18.** Séchage des éprouvettes de mortiers dans une étuve à 85°C.



**Fig. II-19.** Essai d'absorption capillaire. (trois éprouvettes supportées verticalement sur un bac en verre)

Après 24h de refroidissement dans un dessiccateur pour une stabilisation thermique, les éprouvettes du mortier sont recouvertes avec deux couches de la résine époxy, afin d'éviter un échange hygrométrique entre l'échantillon testé et l'air de laboratoire. Après durcissement de la résine, les éprouvettes testées sont initialement pesées (soit  $M_0$  en g), puis elles sont verticalement supportées sur un bac en verre rempli d'eau distillée, dont la surface non recouverte des échantillons est immergée dans l'eau sur une hauteur de 5 mm. La nappe d'eau est maintenue à niveau constant par un trop-plein (cf. **Fig. II-19**).

Il s'agit alors de suivre l'évolution de la masse de ces éprouvettes au cours du temps. La masse d'eau absorbée est déterminée par des pesées successives des échantillons au court du temps (à 5, 10, 15, 30 et 60 minutes). La seule précaution à prendre consiste à éliminer la pellicule d'eau retenue sur la face inférieure de l'échantillon avant chaque pesée à 0.1 g près de précision.

## **II.8. Compagne des essais expérimentaux réalisés**

Les différents mortiers préparés pour la réalisation de ce travail expérimental, ont été soumis à plusieurs campagnes d'essais (destructifs et non destructifs), conformément à l'organigramme présenté sur la **Fig. II-20**.

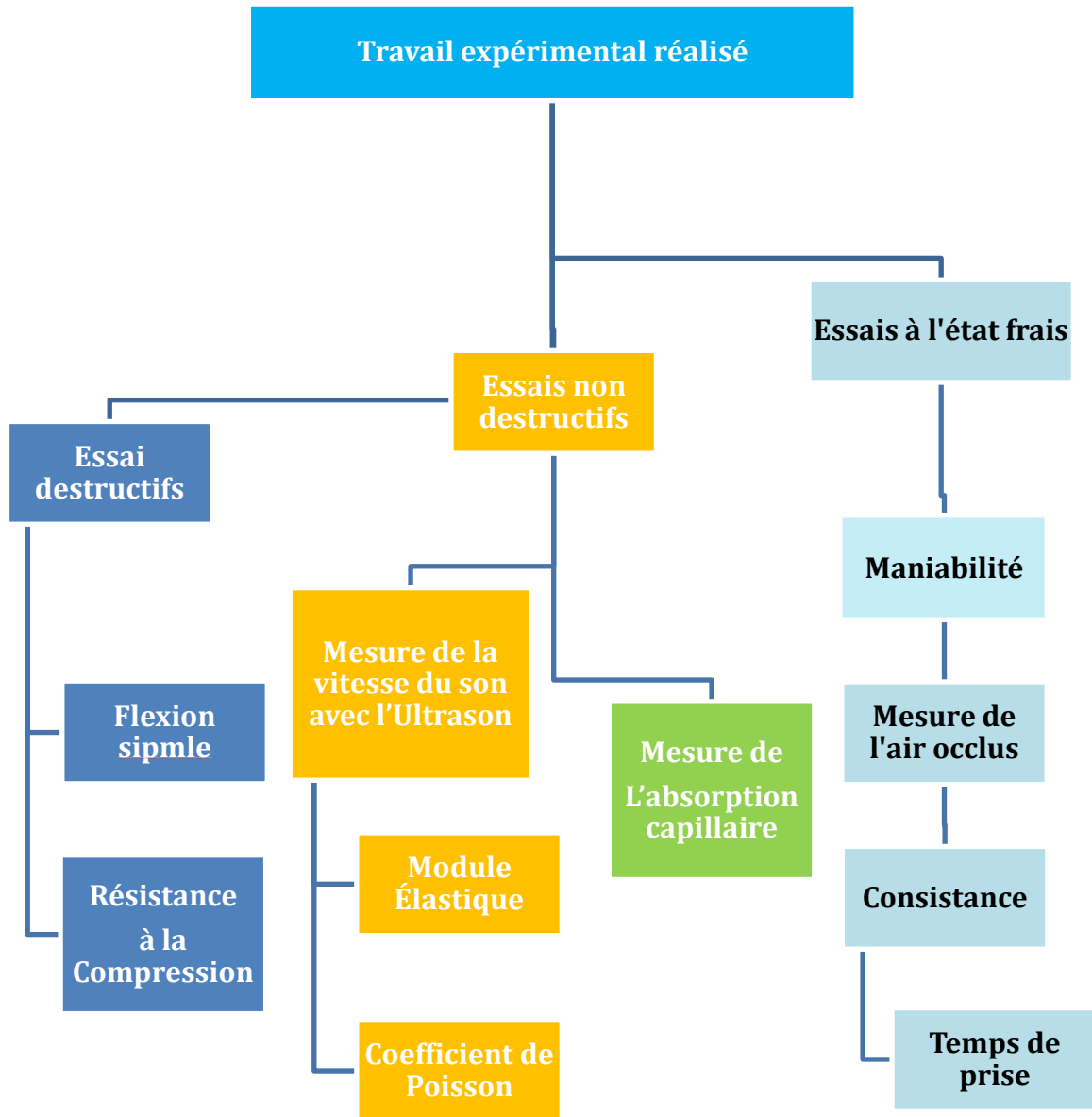
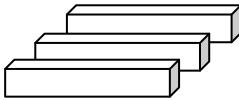
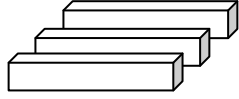
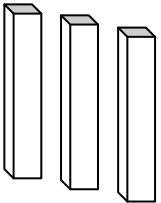


Fig. II-20. Organigramme représentatif des différents essais effectués

## II.9. Mesures expérimentales et nombres d'éprouvettes testés

Pour chaque type des essais effectués, le **Tab. II-15** décrit le nombre des éprouvettes préparés en mortier et qui ont été testés dans ce travail expérimental à des différents âges.

Tab. II-15. Éprouvettes testés dans cette étude expérimentale.

<b>Type d'essai</b>	<b>Éprouvettes préparées</b>	<b>Nombre des éprouvettes testés</b>
<p><b>Essai Ultrason</b></p>	 <p>3 éprouvettes 4 x 4 x 16 cm pour chaque essai.</p> <p>Pour trois rapports E/L différents et pour quatre dosages différents en fillers calcaires, l'essai Ultrason a été effectué pour quatre âges différents aussi (7, 14, 28 et 60 jours)</p> <p><math>N = 3 (\text{épr}) \times 3 (\text{E/L}) \times 4 (\%FC) \times 4 (\text{âges}) = 144 \text{ épr.}</math></p>	<p><b>144</b></p>
<p><b>Essai de flexion</b></p>	 <p>3 éprouvettes 4 x 4 x 16 cm pour chaque essai.</p> <p>Pour trois rapports E/L différents et pour quatre dosages différents en fillers calcaires, l'essai de flexion a été effectué pour quatre âges différents aussi (7, 14, 28 et 60 jours)</p> <p><math>N = 3 (\text{épr}) \times 3 (\text{E/L}) \times 4 (\%FC) \times 4 (\text{âges}) = 144 \text{ épr.}</math></p>	<p><b>144</b></p>
<p><b>Essai d'absorption capillaire</b></p>	 <p>3 éprouvettes 4 x 4 x 16 cm pour chaque essai.</p> <p>Pour trois différents rapports E/L et pour quatre dosages différents en fillers calcaires, l'essai d'absorption capillaire a été effectué sur des éprouvettes de 60 jours.</p> <p><math>N = 3 (\text{épr}) \times 3 (\text{E/L}) \times 4 (\%FC) \times 1 (\text{âge}) = 36 \text{ épr.}</math></p>	<p><b>36</b></p>

**Remarque:** Le nombre d'éprouvettes confectionnées dans cette campagne expérimentale dépasse largement le nombre indiqué sur ce tableau car plusieurs testes préliminaires ont été effectués à blanc afin de trouver des rapports E/L convenables et aussi dans le but de tester la fiabilité de certains dispositifs dans notre laboratoire.



## **II.8. Conclusion**

Ce chapitre a successivement abordé les points suivants :

- Il présente les programmes expérimentaux.
- Il donne les paramètres retenus des matériaux.
- Il regroupe l'ensemble des essais réalisés.

Notre démarche consiste dès le début à faire plusieurs expérimentations sur différents matériaux, par différentes méthodes des essais physiques, des analyses chimiques et des analyses minéralogiques qui sont effectués dans le laboratoire. Alors, nous avons pu avoir une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers qui seront étudiés, dans ce travail de recherche, du point de vue physique et mécanique.

Le présent travail traite l'influence de filler calcaire de l'ENG d'El-Malah (w. de Témouchent), comme substitutions de ciment, sur les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers étudiés à base de différents rapports E/L.

Dans ce chapitre, les méthodes expérimentales choisies (destructives et non destructives) sont de très grand intérêt, et peuvent être très fiable pour effectuer une étude de l'influence des fillers calcaires sur le comportement physique et mécanique des mortiers, telles que la méthode de la propagation des ondes ultrasoniques.

## ***Chapitre III : Analyse et discussions des résultats***

### **III.1. Introduction**

Dans ce chapitre, les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués conformément aux modes opératoires, sur les mortiers étudiés à l'état frais et durci, sont présentés. Une analyse et des discussions des résultats obtenus, suivies d'une comparaison entre les différentes méthodes de mesures utilisées dans cette étude (méthode destructive et non destructive), seront également présentées dans ce chapitre.

Par ailleurs, des corrélations sont effectuées dans ce chapitre entre les résultats des propriétés physiques à l'état frais et durci, et les résultats des propriétés mécanique tels que la résistance à la compression du matériau durci. Par conséquent, pour les différents mortiers étudiés, des équations mathématiques sont données dans ce chapitre, reliant les différents paramètres mesurés à l'état frais et durci et par des essais destructifs et non destructifs à des âges différents du matériau.

## III.2. Influence des fillers calcaires sur les propriétés physiques des mortiers à l'état frais

### III.2.1. Mesure de la maniabilité

À partir de cet essai effectué conformément à la norme NF P 18 452, il est possible de déterminer la classe d'ouvrabilité des différents mortiers. Les résultats obtenus de la maniabilité de différentes formulations étudiés sont présentées en histogrammes dans la Fig. III-1.

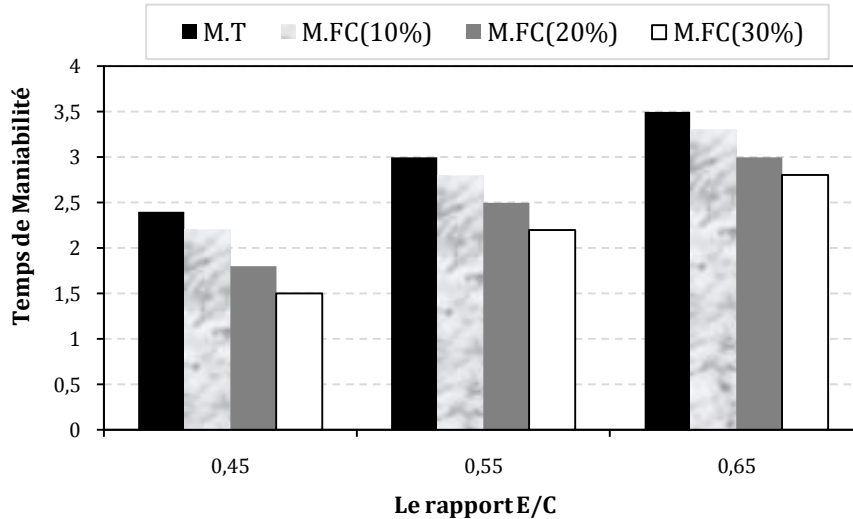


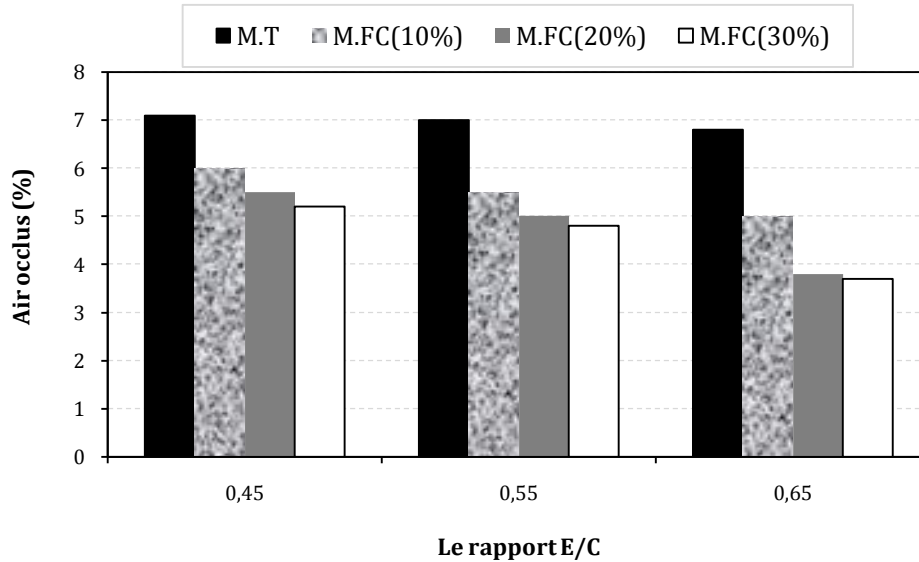
Fig. III-1. Variation de la maniabilité des mortiers étudiés.

D'après les résultats expérimentaux présentés précédemment, l'ajout des fillers calcaires affecte la maniabilité des mortiers à l'état frais. À partir des temps de maniabilité mesurés, le mortier témoin (sans filler) est classé très fluide, pour les rapports E/L de (0,55 et 0,65). Quant au mortier témoin avec un rapport E/L = 0,45, sa maniabilité est de la classe "fluide". La classe "très fluide" correspond aussi aux mortiers avec un dosage en FC de 10 %. Cela a été remarqué seulement pour les formulations avec un E/L de 0,55 et 0,65 (avec une teneur en eau importante). Par contre les mortiers avec un rapport E/L égal à 0,45 et qui contiennent des fillers calcaires sont très plastique. Les classes de maniabilité très plastique et plastique, ont été obtenues aussi dans le cas des mortiers avec un dosage en FC de 30 % respectivement pour les formulations avec un rapport E/L égal à 0,45 et 0,55. La maniabilité des mortiers étudiés est non seulement influencée par le rapport E/L mais aussi par la quantité de fillers calcaires additionnée par substitution du ciment.

### III.2.1. Mesure de l'air occlus

Dans cette étude, l'aéromètre nous a permis de suivre l'effet de dosage en fillers calcaires sur la quantité d'air introduite dans les mortiers étudiés lors de processus de sa fabrication.

La **Fig. III-2** présente l'évolution de l'air occlus du mortier en fonction de sa teneur en fillers calcaires (en %). Nous rappelons que les résultats présentés ci-dessous en histogrammes correspondent à la moyenne arithmétique de trois mesures obtenues par trois essais de l'air occlus effectués pour chacun des mortiers étudiés.



**Fig. III-2.** Variation de l'air occlus des mortiers étudiés.

Les résultats obtenus montrent que les mortiers témoins présentent toujours la quantité la plus élevée en air occlus (**Fig. III-2**) dont sa valeur maximale atteinte est de 7,1 %. L'air occlus diminue avec le dosage en fillers calcaires, Il atteindrait sa valeur minimale de 3,7 % dans le cas de mortier de E/L = 0,65 avec un dosage en FC égal à 30 %. Les particules fines de FC remplissent les vides disponibles entre les particules du mortier réduisant ainsi l'air emprisonné dans ces vides.

### III.3. Influence des fillers calcaires sur la résistance mécanique des mortiers

#### III.3.1. Résistance à la traction par flexion

Dans cette partie d'étude, nous allons examiner le comportement à la traction par flexion des différents mortiers étudiés, avec différents rapport E/L et différents dosages en fillers calcaires (0, 10, 20 et 30 %), en mesurant des résistances ultime à la flexion.

Les résultats présentés ci-dessous sur les **Figs. III-3, III-4 et III-5**, correspondent à la moyenne arithmétique de trois valeurs de résistances, obtenues par trois mesures effectuées pour chaque mortier et pour différents âges (7, 14, 28 et 60 jours).

Une première analyse des résultats, conduit aux observations suivantes :

Les résistances de tous les mortiers augmentent régulièrement en fonction de leurs âges. Cela peut être attribué au temps nécessaire pour l'hydratation du ciment et de son durcissement au cours du temps.

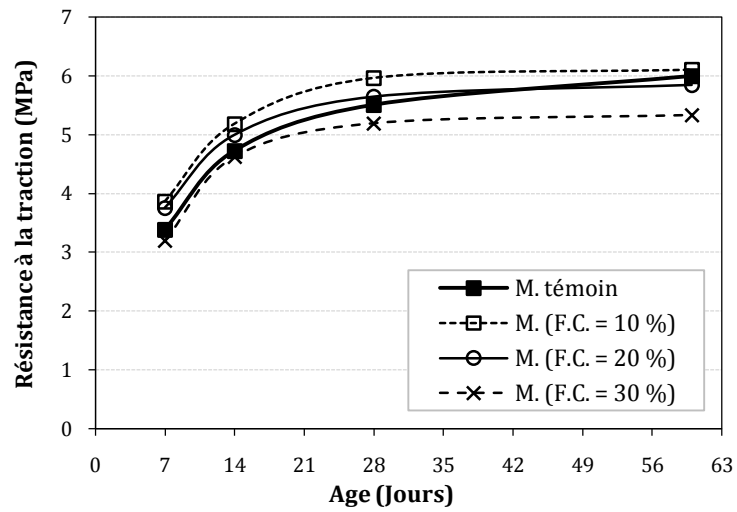


Fig. III-3. Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers avec  $E/L=0.45$  et différents dosages en FC.

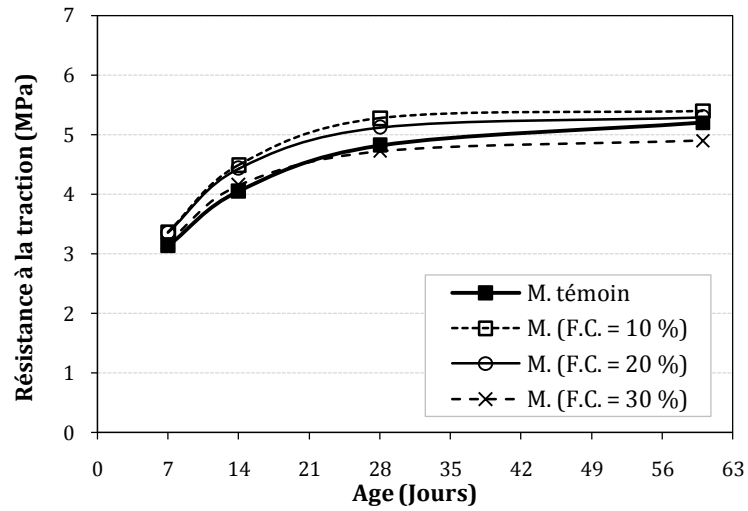
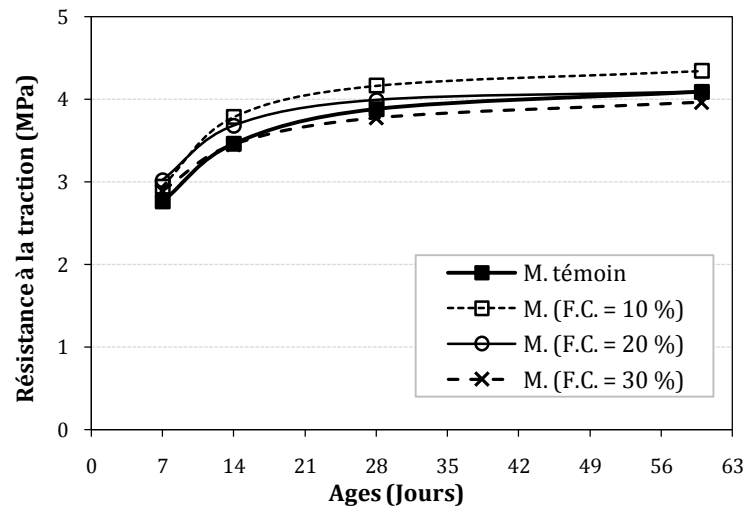


Fig. III-4. Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers avec  $E/L=0.55$  et différents dosages en FC.



**Fig. III-5.** Evolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des mortiers avec  $E/L=0.65$  et différents dosages en FC.

D'après, les résultats illustrés sur les **Figs. III-3, III-4 et III-5**, à l'âge de 28 jours, les résistances à la traction par flexion des mortiers témoins sont 5.5, 4.8 et 3.8 MPa, respectivement pour les mortiers avec des rapports E/L égaux à 0.45, 0.55 et 0.65.

Au jeune âge (à moins de 28 jours), cette évolution de la résistance à la traction des mortiers contenant des fillers calcaires est plus importante que celle du mortier témoin (sans FC). Cela est plus remarqué dans le cas des mortiers avec un dosage en FC de 10 et 20 %. Par ailleurs, au-delà de 28 jours et jusqu'à 60 jours les résultats obtenus montrent un effet inverse: l'évolution de la résistance à la traction par flexion des mortiers témoins est plus importante (pente de la courbe plus importante) par rapport à celle des mortiers qui contiennent des fillers. Ces derniers ont donc un effet sur la résistance mécanique du matériau au jeune âge. Les mortiers avec un dosage en FC égal à 30 % donnent des résistances les plus faibles par rapport aux autres mortiers. Cette réduction de la résistance à la traction des mortiers à liant binaire (avec un fort dosage en fillers) s'explique par leur dosage en ciment Portland plus faible, qui induit une diminution de la production d'hydrates. Et de ce changement on déduit que le rapport E/C jouent un rôle fondamental dans l'accélération de la résistance à la traction aux jeunes âge.

Ces premiers résultats de la résistance à la traction des mortiers avec différents dosage en fillers, indiquent que les mortiers à base du 10 % de FC, et pour les différents rapports de E/L, représentent toujours les meilleurs valeurs de résistance en flexion. On constate aussi que l'analyse de l'évolution de la résistance à la traction des mortiers étudiés indique que les mélanges contenant 20 % de fillers calcaires développent des résultats plus ou moins similaires à celles du mortier témoin à toutes les échéances.

### III.3.2. Résistance à la compression

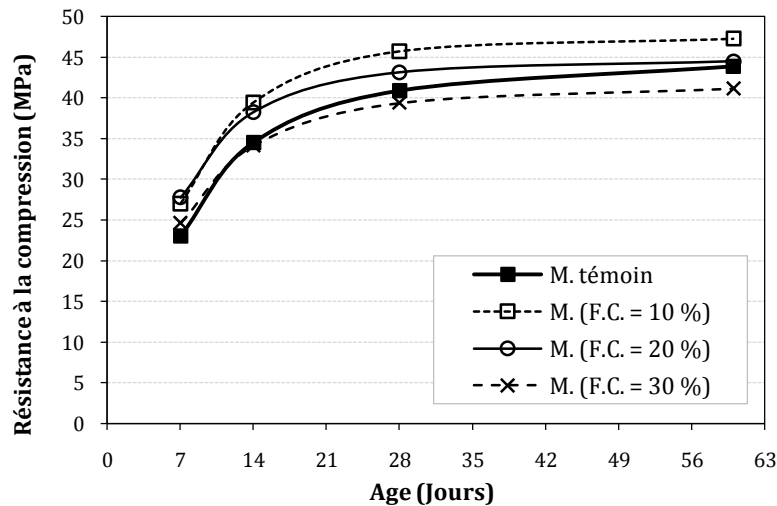
Les figures présentées ci-dessous (**Figs. III-6, III-7 et III-8**) montrent la variation de la résistance mécanique à la compression des mortiers avec différents rapports E/C (0.45, 0.55, 0.65) en fonction de différents âges (7, 14, 28 et 60 jours).

Notons que les valeurs illustrées sur ces figures correspondent à la moyenne arithmétique de six valeurs de résistance à la compression mesurées sur les six demi-éprouvettes obtenues après l'essai de la traction par flexion à trois points (voir les Figs II-12, II-13 et II-14).

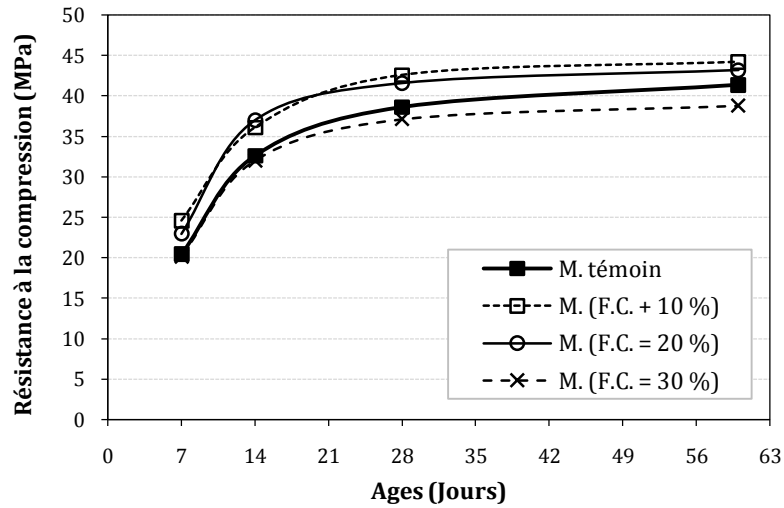
Les Figs. III-6, III-7 et III-8, montrent que la résistance en compression augmente en fonction de l'âge du matériau (à 7, 14, 28 et 60 jours). Cela est remarquable pour tous les mortiers étudiés et quelque soit le dosage en fillers calcaires (0, 10, 20 et 30 %).

Il est important de noter qu'à l'âge de 28 jours, les résistances en compression des mortiers témoins (sans FC) sont 40.9, 38.6 et 35.6 MPa respectivement pour les mortiers avec des rapports E/L égaux à 0.45, 0.55 et 0.65.

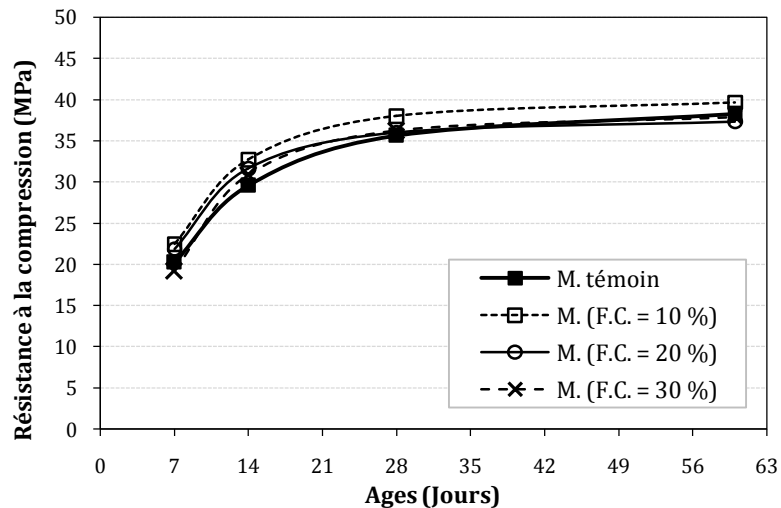
On remarque aussi, à partir des résultats illustrés sur les figures ci-dessous, que la résistance à la compression au jeune âge (à 7 et 14 jours) des mortiers à base de fillers calcaires, est relativement supérieures par rapport à celles des mortiers témoins, principalement pour les mortiers qui contiennent des taux de FC égaux à 10 et 20 %.



**Fig. III-6.** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec  $E/L=0.45$  et différents dosages en FC.



**Fig. III-7.** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec  $E/L=0.55$  et différents dosages en FC.



**Fig. III-8.** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers avec  $E/L=0.65$  et différents dosages en FC.

On peut déduire, à partir des résultats obtenus, que l'influence physique et chimique des fillers calcaires, constatée directement avec le changement de différents dosages utilisé, est évaluée par le changement proportionnel de la résistance mécanique du mortier avec différents taux de fillers calcaires et pour des âges différents (cf. **Figs. III-6, III-7 et III-8**).

On remarque aussi à partir des figures ci-dessus qu'au delà de 28 jours, l'évolution de la résistance en compression des mortiers à base des fillers calcaires devient plus faible par rapport à l'évolution des mortiers témoins. Ceci est remarquable quelque soit le rapport  $E/L$ . Les résistances à la compression des mortiers contenant des fillers calcaires et des mortiers témoins sont presque identiques à l'âge de 60 jours. Donc, nous constatons que les fillers calcaire perdent de leurs influences en fonction du temps. Nous exceptons de ces constatations les mortiers avec un taux de FC égal à 30 %. Ces derniers donnent des résistances plus faibles que celles des mortiers sans FC. Ceci est dû principalement à la



faible teneur en ciment (à cause de teneur élevée en FC) qui induit moins d'hydrates produites dans le matériau durci.

Les résultats obtenus dans le cas des mortiers préparés avec un taux de FC égal à 10 %, représentent toujours les meilleurs résultats de la résistance en compression, quelque soit le rapport E/L. Ces résultats sont similaires à celles obtenus dans le cas des résistances en traction.

Les résultats obtenus montrent aussi que les mortiers avec un rapport E/L égal à 0.65 donnent toujours des résistances à la compression les plus faibles par rapport aux autres. Ceci est expliqué par le fait qu'un rapport E/L élevée conduit à une porosité importante, et par conséquent, à une faible résistance mécanique.

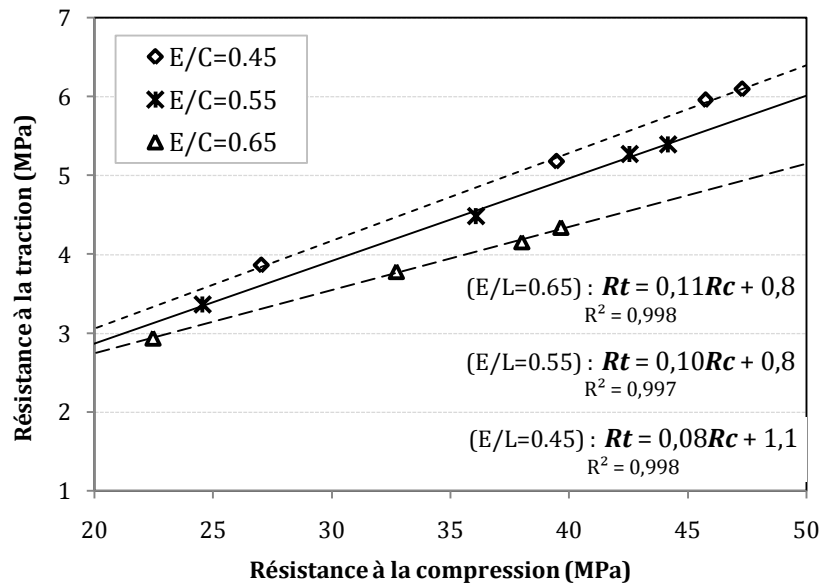
D'après ces résultats mécanique à la traction et à la compression, nous constatons que:

Les fillers calcaires améliorent la résistance du mortier au jeune âge. Donc, les fillers jouent un rôle fondamental dans l'accélération de résistance à la compression. Ceci est dû essentiellement aux caractéristiques des fillers calcaires qui forment un noyau où se cristallise tout autour la portlandite, et par conséquent, provoquer une accélération de l'hydratation des grains de ciment.

Cependant, les mélanges, contenant 20 % et 30 % des fillers calcaires, accordent une résistance plus faible que celle de mortier avec un taux de 10 % de fillers calcaires. Cette réduction de la résistance à la compression des mortiers à liant binaire s'explique par leur dosage en ciment Portland plus faible, qui induit une diminution de la production des hydrates. Et de ce changement on déduit que le rapport E/C jouent un rôle fondamental dans l'accélération de la résistance mécanique aux jeunes âge.

### **III.3.3. Relation entre les résistances à la traction et à la compression du mortier**

Dans le but de définir une relation entre les résistances à la traction et à la compression des mortiers avec 10 % de FC, que nous considérons meilleurs vis-à-vis la résistance mécanique, sur la **Fig. III-9** nous présentons la résistance à la traction de ces mortiers (de différents rapports E/L) en fonction de leur résistance à la compression.



**Fig. III-9.** Évolution de la résistance à la traction en fonction de résistance à la compression des mortiers contenant 10 % de FC.

Les résultats illustrés sur la **Fig. III-9** montrent que l'évolution de la résistance en traction peut être estimée correctement en fonction de la résistance en compression par une fonction linéaire quelque soit le rapport E/L. Les coefficients de régressions indiqués sur la **Fig. III-9** (de 0.99) indiquent la bonne linéarité de ces résultats.

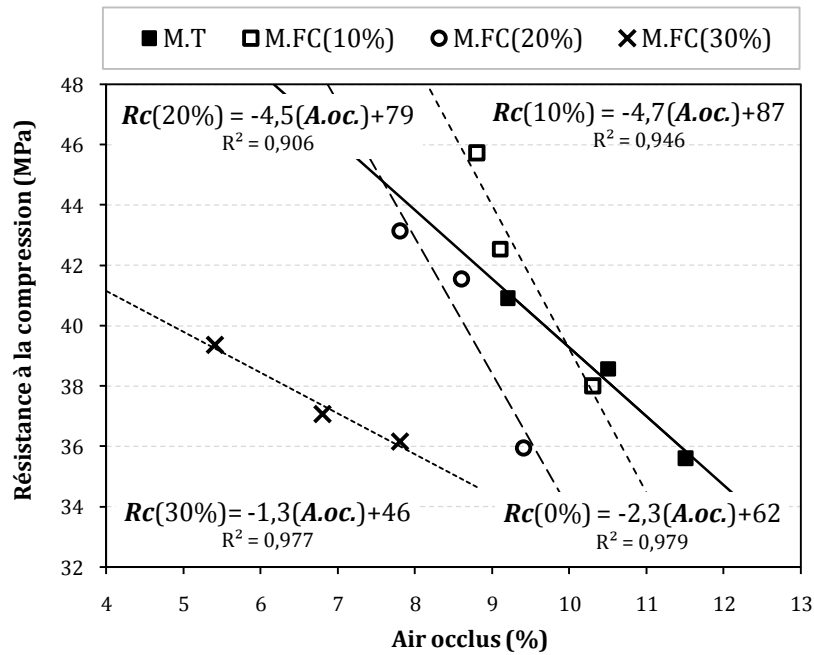
Des équations mathématiques ont pu être données, déterminant la résistance en compression à partir de la résistance en traction des mortiers contenant 10 % de fillers calcaires. Ces relations (sous forme  $R_t = a \cdot R_c + c$ ) montrent, à partir de la valeur de coefficient "a", que plus le rapport E/L augmente, plus la valeur de "a" est élevée. La résistance à la compression du mortier est égale à 9, 10 et 12 fois la résistance à la traction pour des rapport E/L égaux à 0.45, 0.55 et 0.65 respectivement.

#### III.3.4. Corrélation entre la résistance à la compression et l'air occlus du mortier

Afin de pouvoir donner une relation entre la résistance en compression et l'air occlus, déterminé à l'état frais, nous présentons sur la **Fig. III-10** l'évolution de la résistance en compression à l'âge de 28 jours pour l'ensemble des mortiers étudiés, avec et sans fillers calcaires. Notons aussi que chaque point illustré sur la **Fig. III-10** correspond à un des rapports E/L étudiés.

Les résultats obtenus montrent que plus le pourcentage de l'air occlus dans le matériau est élevé, plus sa résistance en compression diminue.

La résistance en compression des matériaux étudiés peut être estimée correctement à l'aide d'une fonction linéaire. Des équations mathématiques sont données sur la **Fig. III-10** sous la forme:  $R_c = -a (A.oc.) + c$ , dont les coefficients de régressions  $R^2$  sont supérieurs de 0.9 indiquant une très bonne linéarité des résultats obtenus avec des mortiers de différents rapports E/L.



**Fig. III-10.** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'air occlus des mortiers à l'âge de 28 jours

Les équations obtenus dans le cas des mortiers avec 10 et 20 % de fillers calcaires sont presque identiques avec des valeurs de "a" indiquées sur les équations au alentour de (4,5). Cela peut aussi être confirmé par l'observation de la pente des deux droites qui est presque le même correspondant à ces deux mortiers (avec 10 et 20 % de FC). Nous avons constaté aussi que la résistance du matériau diminue avec la valeur de coefficient "a" dans l'équation. On peut dire finalement qu'il est possible d'estimer la résistance à la compression d'un matériau à partir de sa teneur en air occlus à l'aide des équations données pour les différents dosages en fillers calcaires étudiés.

### III.3.5. Évaluation de la résistance mécanique du mortier à l'aide d'un essai non destructif

Dans cette partie, un essai non destructif est utilisé pour la détermination de la résistance mécanique du matériau. Alors, des mesures de la propagation des ondes ultrasoniques ont été donc effectuées pour la détermination des caractéristiques mécaniques des mortiers étudiés, principalement la résistance en compression calculée à partir du module d'élasticité. Ce dernier est calculé à partir des mesures de la vitesse du son dans les sens longitudinal et transversal de chaque éprouvette du mortier testées.

#### III.3.5.1. Vitesse du son dans le sens longitudinal

Ci-dessous, sur les **Figs. III-11, III-12 et III-13**, les variations de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques mesurée dans le sens longitudinal, sont présentées pour les différents mortiers étudiés, et aux différents âges du matériau.

il faut noter d'abord que les valeurs présentées dans cette partie, sur les figures ci-dessous, correspondent toujours à la moyenne arithmétique de trois valeurs obtenues par trois vitesses du son mesurées dans le sens longitudinal de l'éprouvette du mortier.

Notons aussi que ces mesures de la vitesse du son (essai non destructif) ont été effectuées sur toutes les éprouvettes du mortier de  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ , avant chaque essai destructif (d'écrasement à l'aide d'une presse hydraulique).

Les résultats des vitesses mesurées, montrent que la vitesse du son est influencée par le l'âge de l'éprouvette testé, car au cour du temps plus d'hydrates se forment rendant le matériau plus compacte, ce qui permet à une meilleure propagation du son à travers le mortier étudié. De plus, il est clairement remarquable que le filler calcaire influe aussi sur la vitesse du son par le fait de sa finesse qui peut modifier la structure poreuse du matériau.

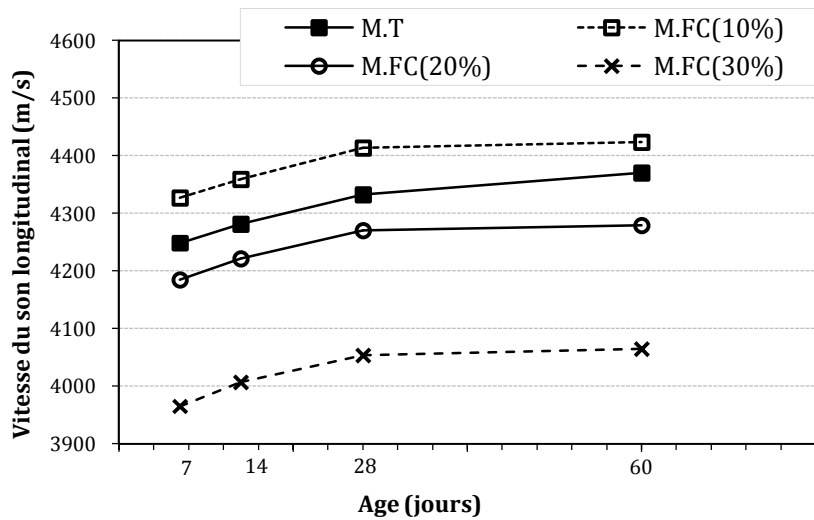


Fig. III-11. Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction de l'âge des mortiers avec un rapport  $E/L=0.45$ .

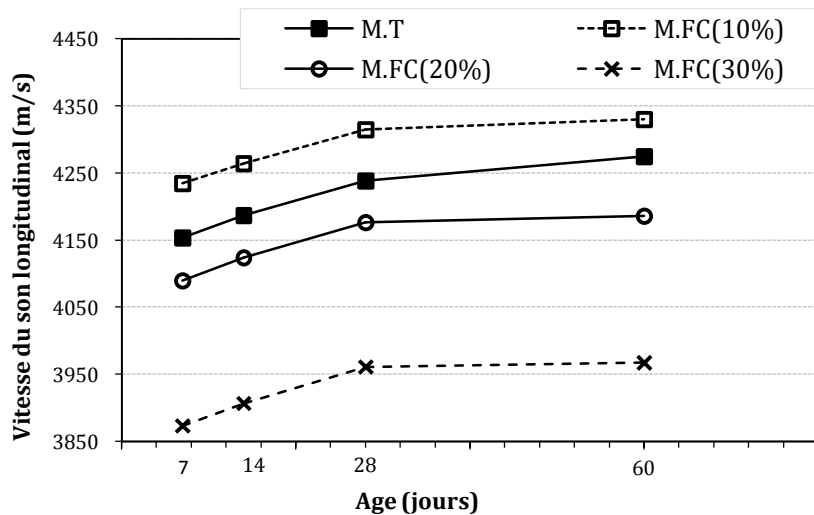
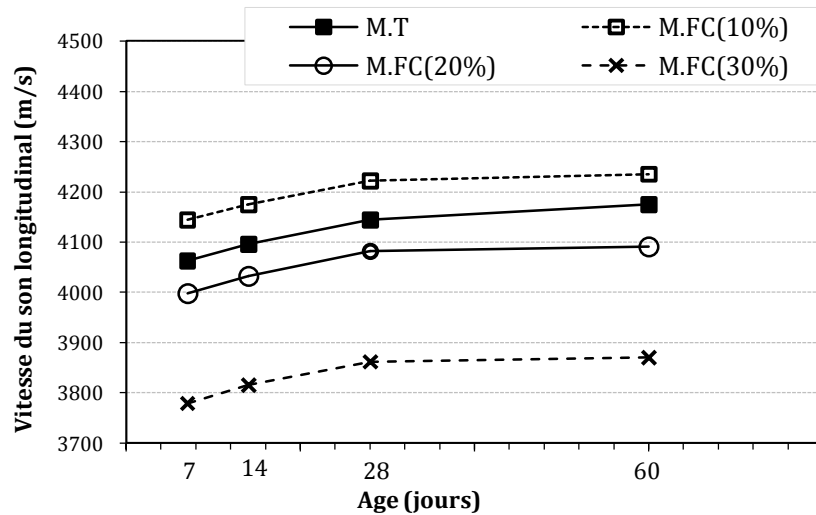


Fig. III-12. Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction de l'âge des mortiers avec un rapport  $E/L=0.55$ .



**Fig. III-13.** Variation de la vitesse longitudinale du son en fonction de l'âge des mortiers avec un rapport  $E/L=0.65$ .

Au jeune âge, on peut observer une évolution importante de la vitesse du son à cause de l'évolution de la compacité du matériau en cette phase de maturation. Cette augmentation de la vitesse du son devient plus faible au-delà de 28 jours et jusqu'à l'âge de 60 jours, car le filler calcaire est un matériau inerte qui ne représente pas un effet pouzzolanique à long terme. Avec un dosage plus important en filler calcaire et donc avec une quantité plus faible du ciment dans le mortier, ce dernier peut être avec moins d'hydrates (moins de gel C-S-H) dans sa structure à long terme.

Pour tous les différents rapports de  $E/L$ , les mortiers à base de 10 et 20 % de fillers donnent de meilleurs résultats de la vitesse d'ondes ultrasonique. Ce résultat correspond parfaitement avec les résultats de la résistance mécanique, obtenus par l'essai destructif décrit précédemment.

Par ailleurs, les résultats illustrés sur les **Figs. III-11, III-12 et III-13**, montrent que la vitesse du son est aussi influencée par le rapport  $E/L$ . Les vitesses enregistrées dans le cas d'un rapport  $E/L$  faible sont plus élevées que celles obtenues dans le cas d'un mortier avec un rapport  $E/L$  élevée. Donc, lorsque le rapport  $E/L$  augmente, la valeur de la propagation des ondes ultrasoniques correspondante diminue. Ce paramètre ( $E/L$ ) qui influe sur la porosité du matériau et par conséquent sur sa compacité, influe donc sur la vitesse d'onde ultrasonique dont le vide, existant dans les pores dans le matériau, représente un obstacle pour sa propagation.

### III.3.5.2. Vitesse du son dans le sens transversal

les variations de la vitesse de propagation des ondes ultrasoniques, mesurée dans le sens transversal de l'éprouvette du mortier, à des différents âges sont présentés ci-dessous sur les **Figs. III-14, III-15 et III-16**.

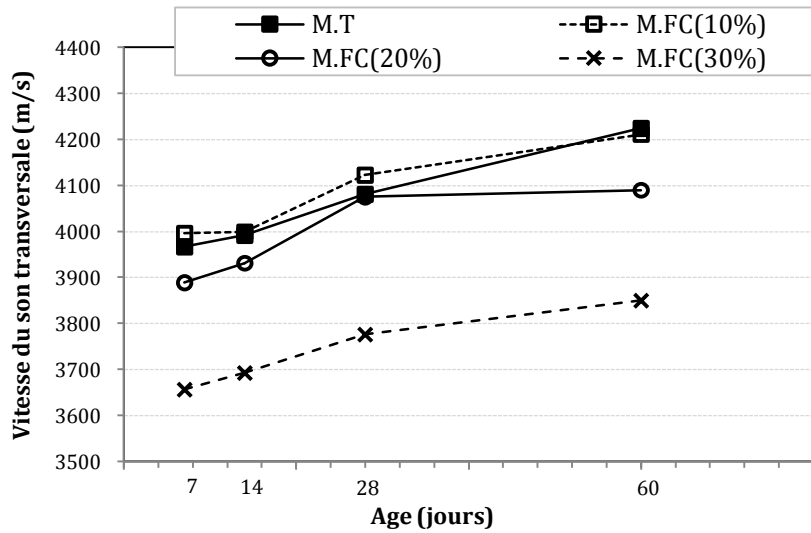


Fig. III-14. Variation de la vitesse transversale du son en fonction de l'âge des mortiers avec un rapport  $E/L=0.45$ .

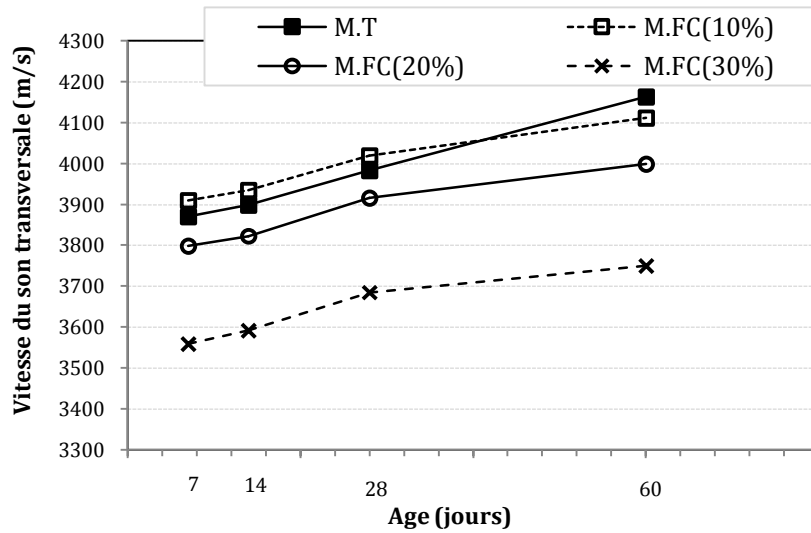


Fig. III-15. Variation de la vitesse transversale du son en fonction de l'âge des mortiers avec un rapport  $E/L=0.55$ .

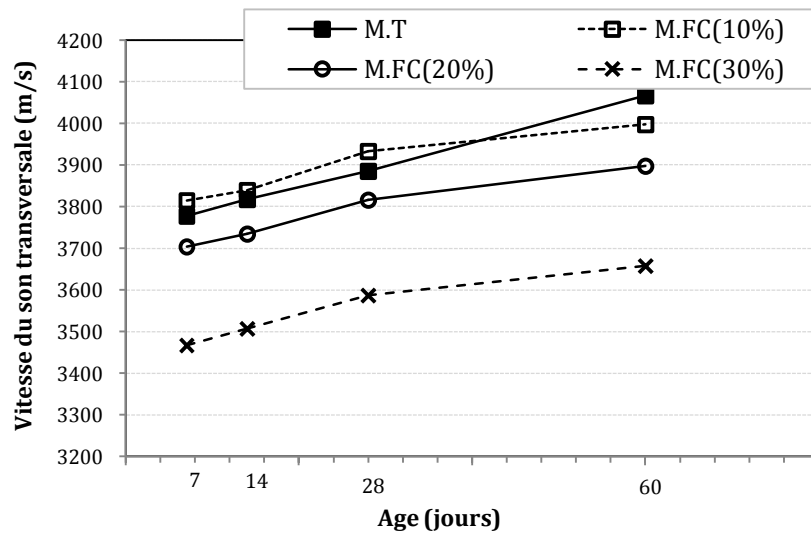


Fig. III-16. Variation de la vitesse transversale du son en fonction de l'âge des mortiers avec un rapport  $E/L=0.65$ .

Les évolutions des vitesses d'ondes ultrasoniques, mesurées dans le sens transversal de l'éprouvette et celles obtenus dans son sens longitudinal son similaires. Généralement, la vitesse du son augmente en fonction de l'âge du mortier. Cela confirme la fiabilité du dispositif "ultrason" utilisé dans cette campagne expérimentale.

D'après les résultats illustrés sur les **Figs. III-14, III-15 et III-16**, on remarque plus d'erreurs sur les vitesses d'ondes ultrasoniques, obtenues par des mesures effectuées dans le sens transversales que celles effectuées dans le sens longitudinal. Nous pensons que cela s'est produit à cause des dimensions inférieures de corps d'épreuve dans le sens transversal. On obtient alors moins d'erreur sur les mesures de ces vitesses du son à l'aide d'un ultrason quand l'échantillon est de taille importante.

En outre, les résultats montrent que les mortiers avec un taux de FC égal à 10 % donnent toujours les vitesses dans le sens transversal les plus élevées par rapport aux autres mortiers étudiés. Ce qui correspond à des résistances plus meilleures dans le cas de ces mortiers. Ce résultat est similaire à celui obtenu dans le cas des vitesses mesurées dans le sens longitudinal. Par ailleurs, les mortiers avec 30 % de FC présentent toujours les vitesses les plus faibles par rapport au autre dosage en fillers, ce qui correspond aux résistances mécaniques les plus faibles, mesurées dans la partie précédente à l'aide d'un essai destructif. De plus, à cause de leurs porosités élevées, les mortiers avec un rapport E/L élevée (0.65) donnent toujours les vitesses les plus faibles par rapport aux autres mortiers testés.

### III.3.5.3. Calcul de Module d'élasticité dynamique

Le module élastique a été calculé à partir des mesures de la vitesse d'ondes ultrasonique. Nous avons choisi dans cette partie de se limiter au module d'élasticité longitudinal, calculé à partir des vitesses mesurées dans le sens longitudinal de l'éprouvette du mortier. La relation théorique utilisée pour le calcul de ce module d'élasticité dynamique pour nos mortiers ordinaires étudiés est donnée comme suit:

$$E_d = \rho V^2 \cdot \left[ \frac{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}{(1 - \nu)} \right]$$

Avec :

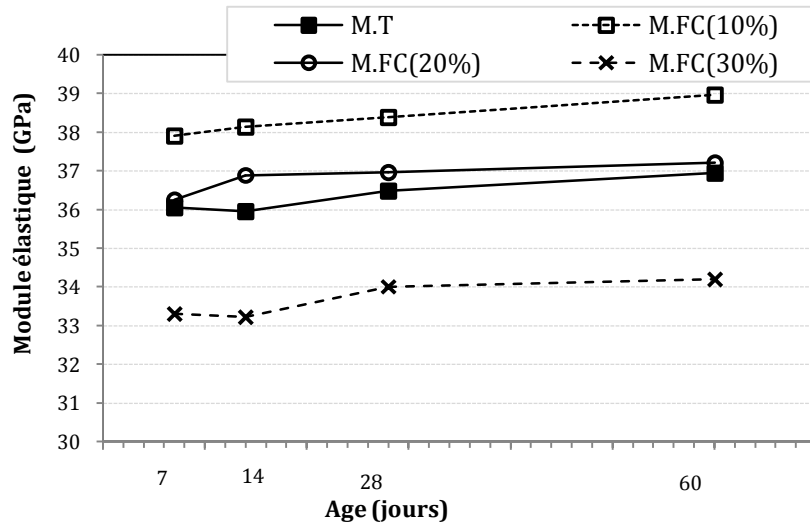
$V$  : vitesse des ondes ultrasoniques (km/s).

$\rho$  : Masse volumique du mortier (t/m<sup>3</sup>).

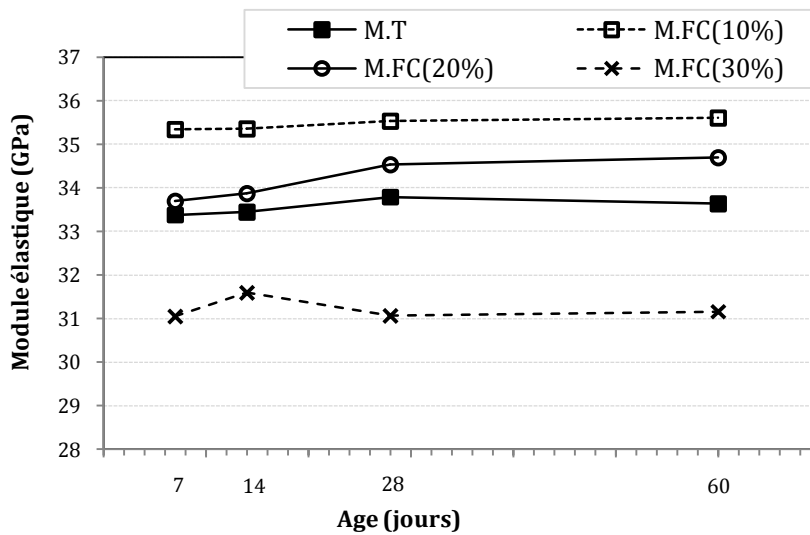
$\nu$  : Coefficient de poisson

Le coefficient de poisson est le rapport entre la déformation transversale et longitudinale du matériau en valeurs relative. Sa valeur varie, de 0,15 à 0,30 pour des matériaux cimentaire. Pour nos mortiers ordinaires, on le prend égal à 0.20 qui représentent une valeur souvent admise dans la littérature par les chercheurs dans le domaine des matériaux cimentaires ordinaires.

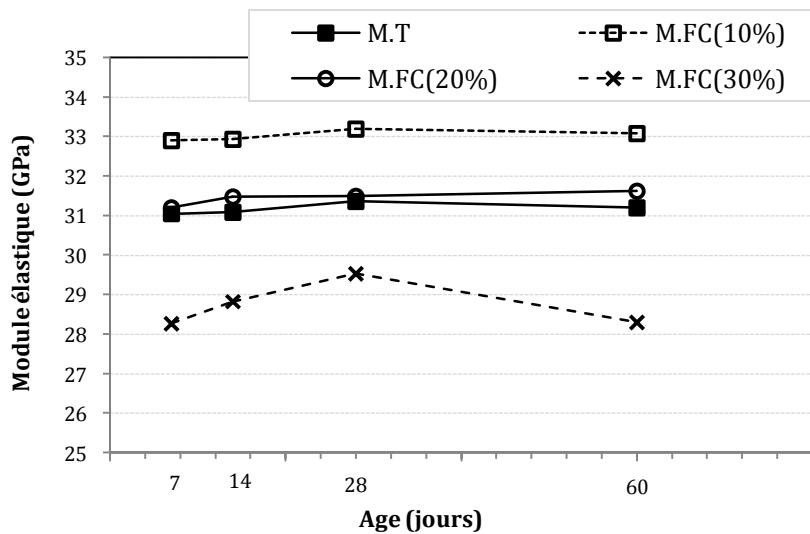
Les valeurs calculées de module d'élasticité dynamique de nos mortiers à l'âge de 28 jours sont présentées ci-dessous sur les **Figs. III-17, III-18 et III-19**.



**Fig. III-17.** Module d'élasticité dynamique des mortiers avec différents dosages en FC et un rapport  $E/L = 0.45$ .



**Fig. III-18.** Module d'élasticité dynamique des mortiers avec différents dosages en FC et un rapport  $E/L = 0.55$ .



**Fig. III-19.** Module d'élasticité dynamique des mortiers avec différents dosages en FC et un rapport  $E/L = 0.65$ .



Les résultats obtenus montrent aussi que la substitution de 10 % du ciment par les fillers calcaires, représente la meilleure valeur de module d'élasticité, correspondant à la vitesse du son la plus élevée, par rapport aux autres bétons étudiés. Les formulations du mortier avec 30 % de FC donnent toujours les valeurs les plus faibles en module d'élasticité dynamique. Ceci est plus remarqué quand le rapport E/L est élevé, c'est-à-dire pour un mortier avec une porosité élevée.

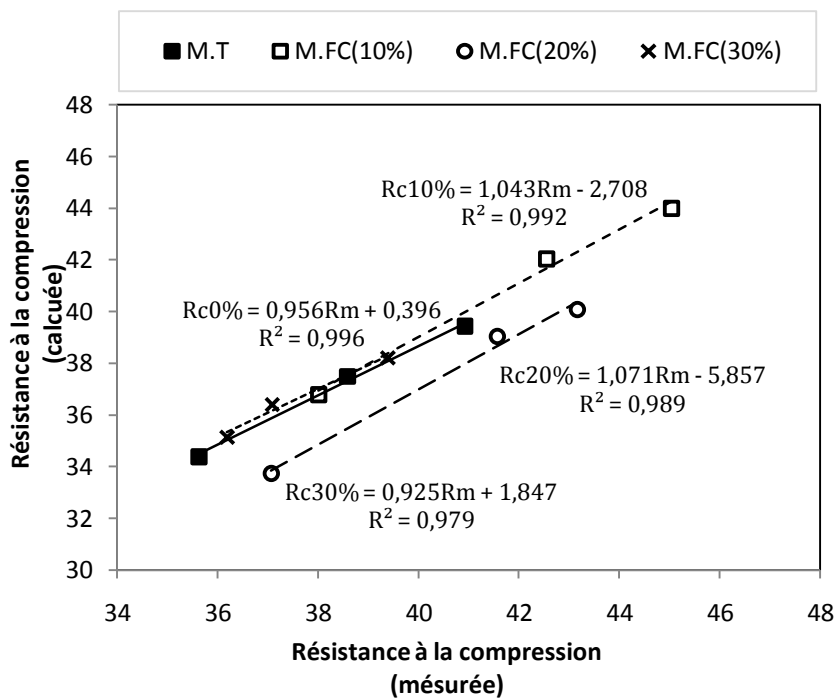
### III.3.6. Comparaison entre les résistances à la compression mesurées et calculées

Les résistances à la compression, obtenues à l'aide d'un essai destructif (essai d'écrasement), sont comparées ici avec les valeurs des résistances calculées à partir des valeurs des modules élastiques estimés en utilisant un "Ultrason" (essai non destructif), à partir des mesures de vitesses des ondes de propagation du son.

Où:  $R_c$  est la résistance mécanique à la compression du matériau.

La figure ci-dessous (**Fig. III-20**) présente, pour des mortiers de 28 jours, l'évolution de la résistance en compression mesurées en fonction des résistances en compression calculées à partir des vitesses du son mesurées dans le sens longitudinal des éprouvettes testées.

Nous rappelons que les valeurs présentées sur cette figure correspondent à la moyenne arithmétique de trois mesures effectuées sur trois échantillons de chaque formulation des mortiers étudiés.



**Fig. III-20.** Comparaison entre les résistances calculées et mesurées des mortiers à l'âge de 28 jours

Les résultats obtenus dans cette partie d'étude, montrent que l'évolution de la résistance à la compression peut être estimée correctement par une équation linéaire à partir des résistances à la compression mesurés et calculées obtenues pour chaque mortier étudié. On remarque aussi que la valeur de la résistance à la compression mesurée par un essai destructif est très proche de la valeur de résistance calculée à partir des mesures de la vitesse du son. Donc, on peut dire que l'Ultrason utilisé (présenté dans le chapitre II) représente un dispositif très fiable et un outil important pour l'évaluation de la résistance en compression d'un mortier ordinaire.

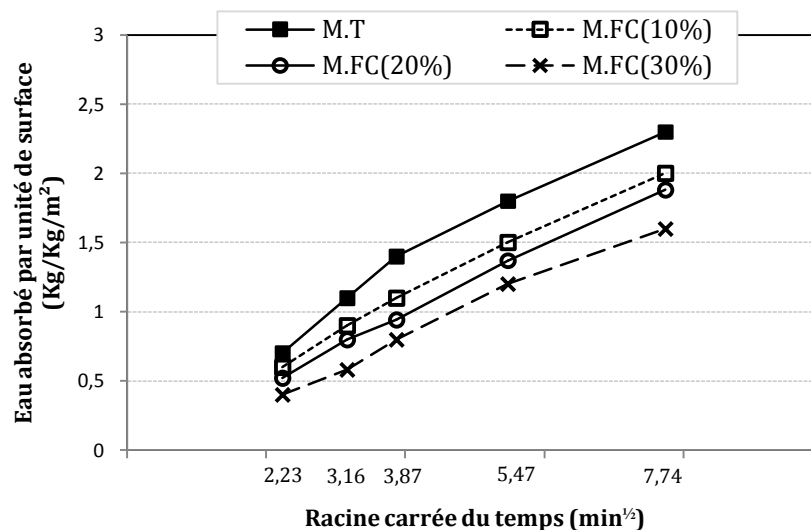
Il est intéressant de noter aussi que des relations mathématiques linéaires ont pu être élaborées (équations illustrées sur la **Fig. III-20**) pour chaque formulation du mortier, dont les coefficients de régression  $R^2$  des droites obtenues est souvent supérieurs de 0,9, indiquant très bonne linéarité des résultats obtenus pour les différents rapports E/L.

Les équations illustrées sur les figures ci-dessus, pour chaque mortier étudié, montrent qu'il est possible de présenter cette évolution entre les deux résistances par une équation sous la forme  $RC_{(MES)} = RC_{(CAL)} + c$ , puisque le coefficient "a" est souvent au alentour de 1.

#### III.4. Influence des fillers calcaires sur l'absorption capillaire des mortiers

Les **Figs. III-21, III-22** et **III-23** présentent l'évolution de la masse d'eau absorbée par les différents mortiers à base de différents taux de fillers calcaires. Cette absorption d'eau est donnée en fonction de la racine carrée du temps. Nous rappelons ici que les mesures de l'eau absorbée ont été enregistrées par des pesées effectuées après 5, 10, 15, 30 et 60 minutes d'immersion dans de l'eau distillée.

Nous rappelons que les valeurs illustrées sur ces figures ci-dessus, sont des moyennes arithmétique de trois valeurs qui correspondent à des mesures effectuées sur trois éprouvettes de  $(4 \times 4 \times 16)$  cm<sup>3</sup> de chaque mortier étudié à l'âge de 60 jours.



**Fig. III-21.** Eau absorbée par unité de surface des mortiers avec rapport E/L=0.45

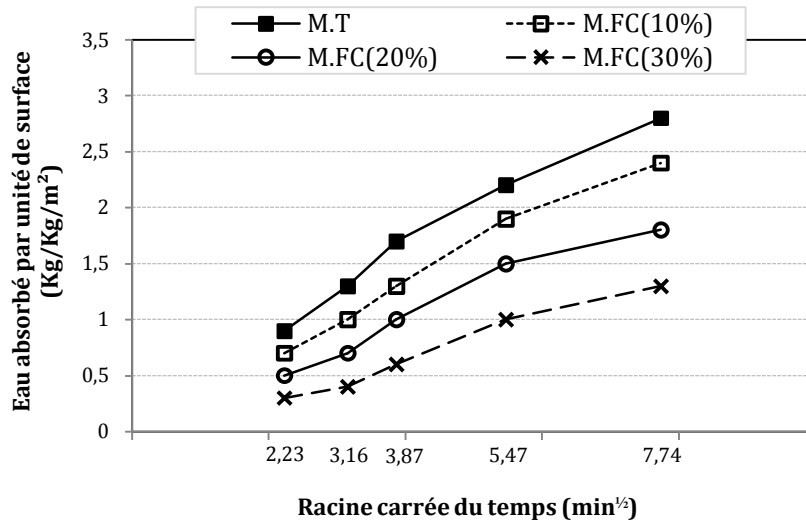


Fig. III-22. Eau absorbée par unité de surface des mortiers avec rapport E/L=0.55

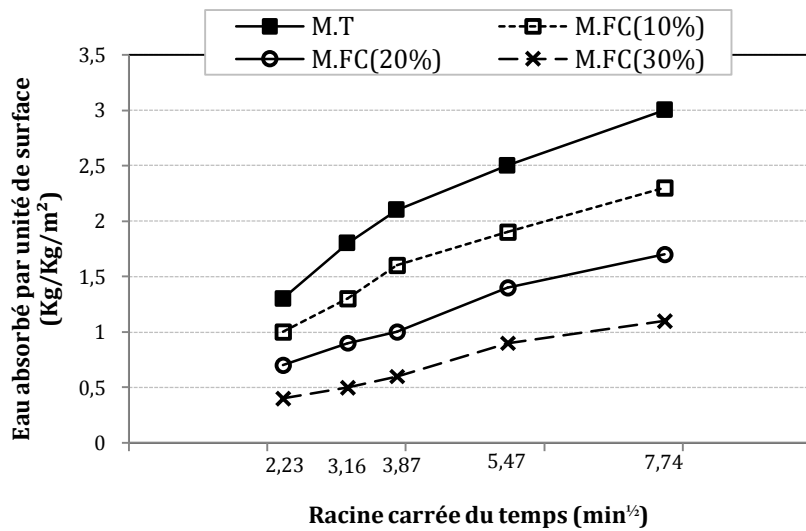


Fig. III-23. Eau absorbée par unité de surface des mortiers avec rapport E/L=0.65

On peut remarquer clairement à partir des figures présentées ci-dessus, que la quantité d'eau absorbée par les éprouvettes du mortier augmente en fonction du temps (la durée d'immersion). On peut constater aussi à partir de ces résultats, que l'absorption de mortier témoin est nettement supérieure à celle des mortiers qui contiennent un taux de fillers calcaires.

Les résultats obtenus montrent que plus le taux des fillers calcaires est important dans le mortier, plus la quantité d'eau absorbée par matériau est faible. Ceci est expliqué par la finesse des fillers calcaires nettement plus supérieure à celle du ciment, qui peut diminuer sa porosité capillaire. Alors, l'incorporation des fillers calcaire diminue

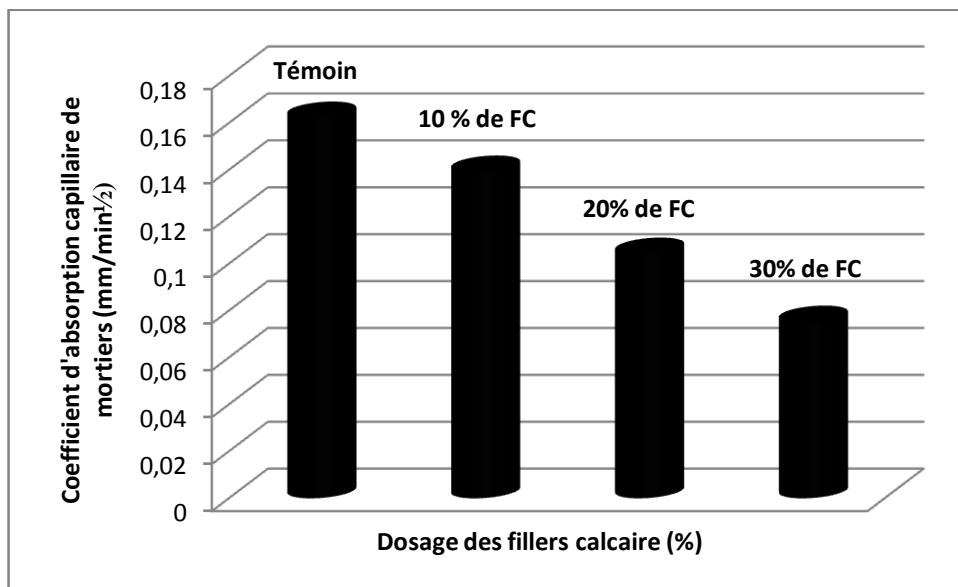
l'absorption d'eau par capillarité, ce qui signifie que les fillers calcaire donnent une très bonne étanchéité, une matrice imperméable et de compacité élevée.

En outre, à cause de sa porosité élevée, les quantités d'eau absorbées par des mortiers avec un rapport E/L élevée (0.65) sont supérieures à celles absorbées par des mortiers avec un rapport E/L égal à 0.55 et 0.45 qui sont avec des porosités relativement plus faibles. Ce qui conduit à une absorption certainement plus élevée des mortiers avec un E/L = 0.65.

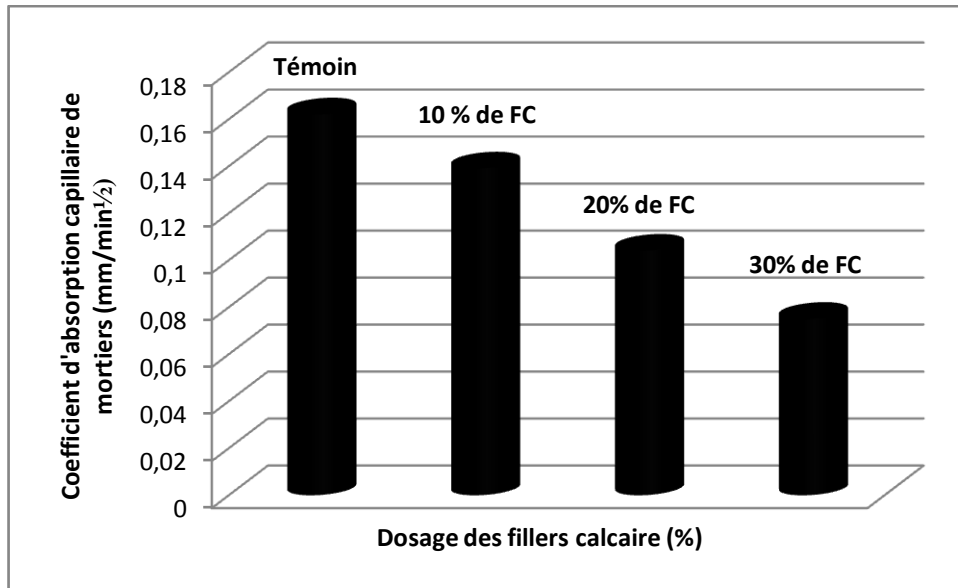
#### III.4.1. Coefficient d'absorption capillaire

La capacité d'absorption est généralement caractérisée par un coefficient d'absorption capillaire. Nous présentons ci-dessous sous d'histogrammes les coefficients d'absorption capillaire des différents mortiers étudiés. Les résultats obtenus indiquent que plus le réseau poreux est fin, plus la cinétique d'absorption et par conséquent le coefficient d'absorption sont faibles. Les résultats présentés sur les **Figs. III-24, III-25 et III-26**, sont obtenus par application de l'équation suivante: coeff. D'absorption = la masse d'eau absorbé par unité de surface  $/\sqrt{t}$ . Ce qui signifie que ce coefficient représente la pente de la fonction entre la profondeur de pénétration en et la racine carrée du temps.

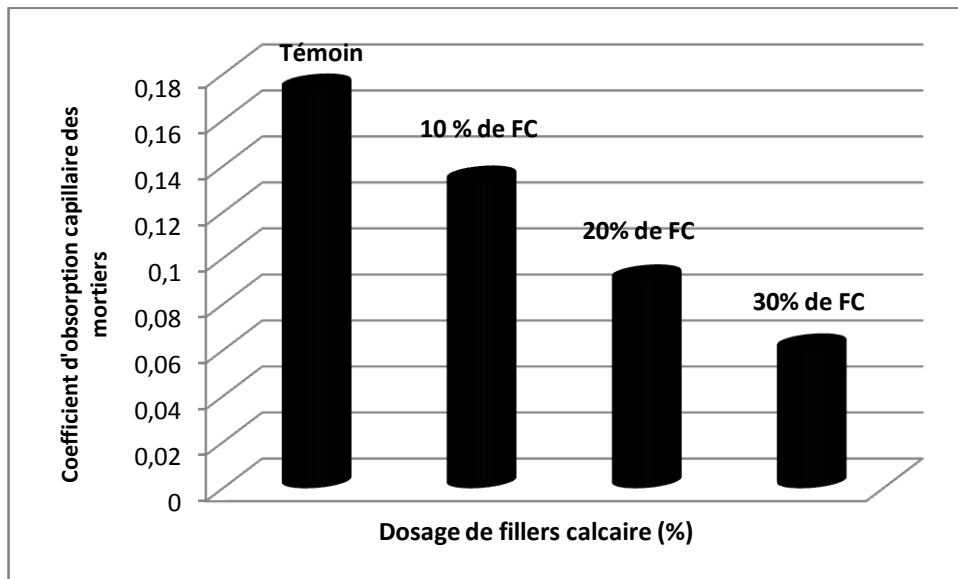
Les histogrammes obtenus montrent l'évolution du coefficient d'absorption à 60 minutes). Les mortiers témoins représentent les coefficients d'absorptions les plus élevés par des valeurs de 0.17, 0.15 et 0.13 mm/min<sup>1/2</sup>, pour les mortiers avec des rapports E/L égal à 0.45, 0.55 et 0.65 respectivement.



**Fig. III-24.** Coefficient d'absorption capillaire des mortiers avec différents dosage en fillers calcaires et un rapport E/L = 0.45.



**Fig. III-25.** Coefficient d'absorption capillaire des mortiers avec différents dosage en fillers calcaires et un rapport E/L = 0.55.



**Fig. III-26.** Coefficient d'absorption capillaire des mortiers avec différents dosage en fillers calcaires et un rapport E/L = 0.65.

Les résultats des coefficients d'absorption calculés montrent que la cinétique d'absorption des mortiers contenant des fillers calcaires est relativement empêchée. Cela explique la diminution des coefficients en parallèle avec l'augmentation des taux de substitution du ciment par 10, 20 à 30 % de fillers calcaires. Ce comportement est attribué par le fait que les fillers calcaires pourraient remplir les microfissures et les pores dans le mortier conduisant à la diminution de la porosité ouverte accessible à l'eau. Par ailleurs, le coefficient d'absorption des mortiers avec un rapport E/L élevé, donne des valeurs plus importantes que celles obtenus dans le cas des E/L faible.

### III.5. Relation entre le coefficient d'absorption et la vitesse longitudinale du son

Dans le but d'étudier la relation entre la sportivité à l'eau du mortier et la vitesse de la propagation d'ondes ultrasonique (mesuré par la méthode non destructive), les histogrammes ci-dessous (Figs. III-27, III-28 et III-29) présentent l'évolution de la vitesse du son propagé au travers des éprouvettes de mortiers à l'âge de 60 jours dans le sens longitudinal en fonction de leurs coefficients d'absorption capillaire.

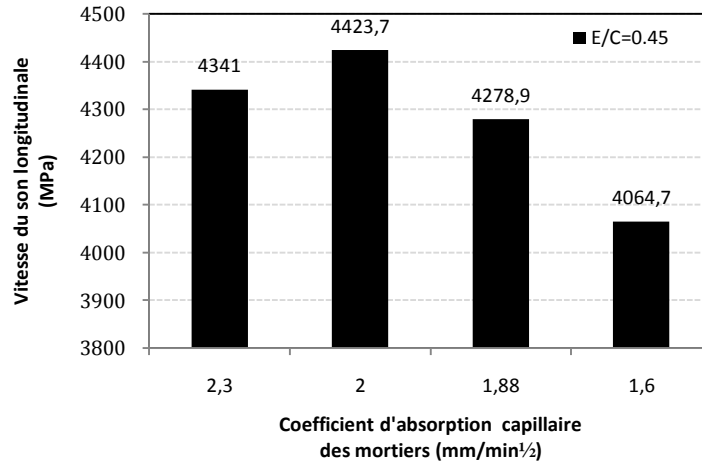


Fig. III-27. Evolution de La vitesse longitudinale du son en fonction de coefficient d'absorption des mortiers à l'âge de 60 jours avec un rapport E/L=0.45

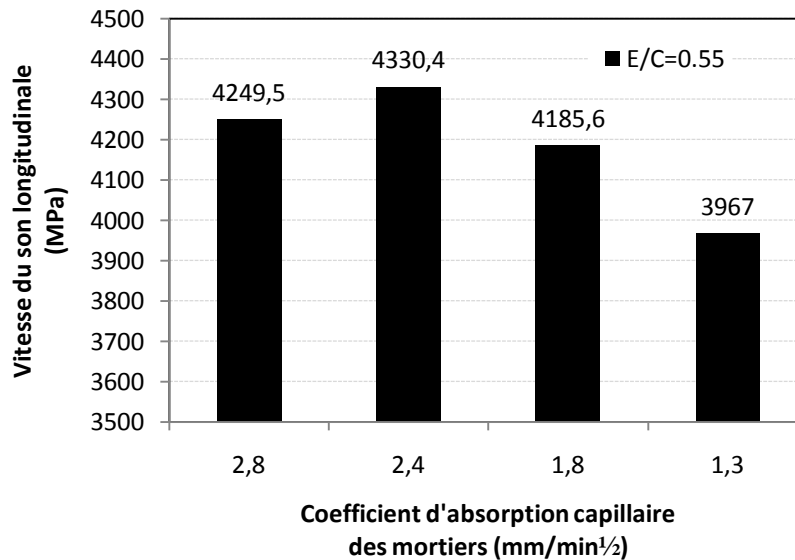
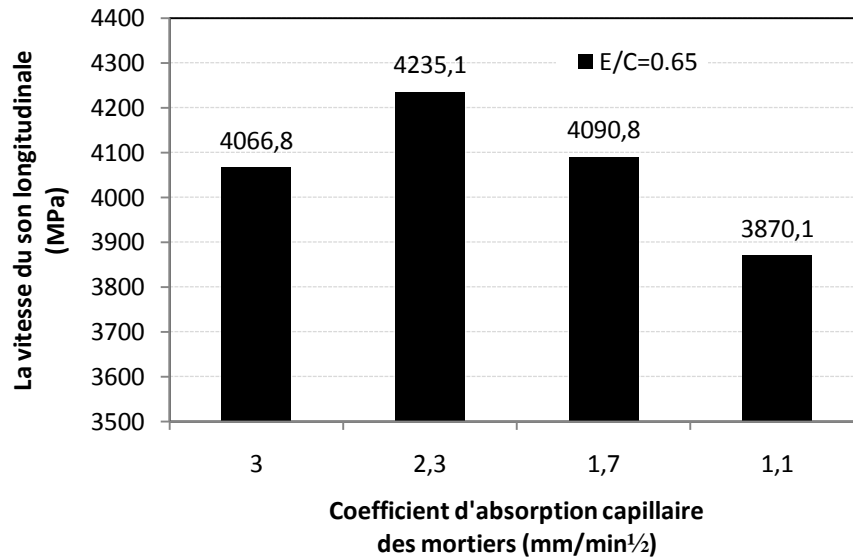


Fig. III-28. Evolution de La vitesse longitudinale du son en fonction de coefficient d'absorption des mortiers à l'âge de 60 jours avec un rapport E/L=0.55



**Fig. III-29.** Evolution de La vitesse longitudinale du son en fonction de coefficient d'absorption des mortiers à l'âge de 60 jours avec un rapport E/L=0.65

Les résultats illustrés en histogrammes sur les figures ci-dessus, montrent que le liant avec 10 % de fillers calcaires représente les valeurs les plus élevées de la vitesse du son dans le sens longitudinal de l'éprouvette. Ce qui nous rappelle la résistance mécanique la plus élevée de cette formulation de mortier (avec 10 % de FC). Par contre ces mêmes formulations du mortier ont un coefficient d'absorption plus faible que celui du mortier témoin. Cela est remarquable pour tous les mortiers avec différents rapport E/L.

Puisque l'évolution de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques avec le coefficient d'absorption capillaire n'ai pas linéaire. La méthode Ultrasonique ne peut être utile pour la détermination de coefficient d'absorption qui est liée principalement à la structure poreuse du matériau, à sa taille des pores, à sa perméabilité et même à son degré de saturation.

### III.6. Conclusion

A la lumière de ce qui précède, on remarque que l'introduction des fillers calcaire améliore le comportement des matériaux à matrice cimentaire dans les environnements, ces derniers contribuent à la densification de la pâte de ciment durcie.

Concernant les résistances, il se dégage de l'étude que, les résistances des mortiers, aux jeunes âges (7 et 14 jours) augmente mais à long terme (60 jours) on a constaté que les résistances ont diminuées.

De plus ces ajouts réduisent l'absorption capillaire en diminuant la porosité de la pâte de ciment durcie et augmentent la résistivité de ces mortiers.

Les effets de la variation de la proportion des fillers calcaire dans un mélange du mortier montrent que La pâte avec 10% de fillers calcaire a produit la vitesse la plus élevée.

## Conclusion Générale

Notre étude expérimentale nous a permis de mettre en évidence la valorisation des fillers calcaires qui peuvent être un ajout minéral additionné dans les matériaux cimentaires par substitution partielle de ciment Portland. Alors, l'objectif principal de ce travail de recherche est d'étudier l'effet de l'activité de fillers calcaires de l'ENG d'El-Maleh (W. de Ain Témouchent), sur les comportements physique et mécanique des mortiers ordinaires à base des matériaux locaux. Des essais destructifs et non destructifs ont été utilisés pour comprendre la caractérisation mécanique des mortiers étudiés avec différents rapports E/L et des dosages en fillers calcaires différents. Cette étude expérimentale nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'étude des propriétés physiques des mortiers à l'état frais nous a permis de conclure qu'une diminution sensible de la quantité d'air occlus est enregistrée pour les mortiers contenant les fillers calcaires. Cette diminution se traduit par une meilleure compacité des mortiers. D'autre part, les fillers calcaire affectent la maniabilité des mortiers frais. Avec une substitution de 30 % du ciment par des fillers calcaires, la maniabilité d'un mortier ordinaire peut passer de la classe très fluide (dans le cas avec 0 % de FC) à la classe très plastique. Ces propriétés physiques et rhéologiques à l'état frais sont aussi influencées par le rapport E/L. Avec l'augmentation de ce dernier, la quantité d'air occlus diminue et la maniabilité augmente.
- Les résistances mécaniques, à la traction par flexion et à la compression, augmentent quand le rapport E/L diminue. Avec l'ajout des fillers calcaires, les mortiers avec un taux de FC égal à 10 % donnent toujours les meilleurs résultats de résistances mécaniques principalement au jeune âge. Ceci est expliqué par la grande finesse des fillers qui peut rendre le matériau plus compacte par une diminution de sa porosité. L'hydratation est accélérée par l'ajout des fillers au jeune âge, conduisant à une résistance mécanique importante au jeune âge, mais cette évolution en résistance est écroulée en fonction du temps (à long terme). Par ailleurs, un fort dosage en FC a un effet inverse sur la résistance mécanique. Il peut conduire à une résistance plus faible que celle d'un mortier sans fillers, car le matériau dans ce cas est avec une faible teneur en ciment et donc moins d'hydrates seront produites dans le mortier durci rendant la résistance mécanique plus faible.
- La vitesse de la propagation d'ondes ultrasoniques à travers le mortier augmente avec sa résistance mécanique. Cette dernière a une relation directe avec la porosité du matériau qui est gouvernée par le rapport E/L. Donc, la vitesse du son diminue quand le rapport E/L est élevé.
- les vitesses des ondes ultrasoniques obtenues sont convenables aux résultats de résistance mécaniques mesurée à l'aide d'un essai destructif (essai d'écrasement). Alors, à partir des mesures effectuées dans ce travail de



recherche, nous avons conclu que l'utilisation de l'Ultrason (essai non destructif) est très fiable pour la détermination de module élastique du matériau et par conséquent de sa résistance mécanique.

- Il est possible d'estimer correctement la résistance à la compression du mortier avec ajout calcaire à l'aide d'une fonction mathématique linéaire à partir des mesures de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques.
- Nos essais ont montrés que les mortiers additionnés par des fillers calcaires (principalement avec 10 et 20 % de FC) développent des résistances à la traction et à la compression à court terme (7 et 14 jours) relativement mieux que celles des mortiers sans FC (témoins). Par contre, à long terme (60 jours) celles-ci diminuent en fonction du pourcentage croissant en fillers calcaire grâce à ses propriétés d'ajout inerte.
- Le coefficient d'absorption d'eau par capillarité est réduit lorsque les fillers calcaires sont ajoutés aux mortiers comme substituant du ciment. L'absorption a été beaucoup plus limitée dans le cas des mortiers avec 30 % d'ajout calcaire.
- À partir de cette étude expérimentale, l'addition des fillers calcaires jusqu'à 10% est bénéfique pour la résistance mécanique à court terme tant que la résistance à long terme. Donc, on peut conclure finalement que la substitution partielle du ciment par des fillers calcaires dans des mortiers de construction offre une nouvelle source d'approvisionnement et permet d'économiser l'énergie nécessaire pour la production du ciment. Elle offre une bonne solution au problème des émissions de CO<sub>2</sub> produite par l'industrie cimentaire pour préserver l'environnement et la protection contre la pollution.

*Les références*

[1] <http://www.ecocem.fr/ciment/>

[2] <https://www.civilmania.com/topic/19149-les-ciments-principe-de-fabrication-ciment-portland/>

[3] <https://fr.scribd.com/doc/66880286/Les-Cours-Materiaux>

[4] **BELHOCINE AIDA NAGOUDI NADJAT** « Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts Minéraux » Université KASDI Merbah – Ouargla Le 06/2014

[5] **Soumaya Amina BENSALIR** « Mécanismes d'altérations des matériaux cimentaires soumis aux milieux fortement agressifs » Université de Mascara- Algérie – Le 2010

[6] **Bitar Zeyneb** « Influence de la surface spécifique des ciments aux ajouts minéraux (calcaire) sur le comportement mécanique du mortier » Université Mohamed Boudiaf - M'sila Le 2015/2016

[7] **AOUIDIDI Lwiza** « Caractérisation d'un ciment à base de pouzzolane » Université Mohamed Boudiaf - M'sila Le 2015/2016

[8] **GUIMER TAREK** « Contribution de l'addition minérale sur les caractéristiques physico-mécaniques des liants et mortiers » UNIVERSITE MOHAMMED KHEIDER - BISKRA – Le 11/2007

[9] [https://www.google.dz/search?q=Figure++Repr%C3%A9sentation+sch%C3%A9matique+de+la+pate+de+ciment+hydrat%C3%A9&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwid4s-Ky9jZAhVHchQKHeWIBzoQ\\_AUICigB&biw=1024&bih=662#imgrc=|4TJP2vSfc35pM](https://www.google.dz/search?q=Figure++Repr%C3%A9sentation+sch%C3%A9matique+de+la+pate+de+ciment+hydrat%C3%A9&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwid4s-Ky9jZAhVHchQKHeWIBzoQ_AUICigB&biw=1024&bih=662#imgrc=|4TJP2vSfc35pM)

[10] [https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m\\_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieus-fortement-agressifs13.html](https://www.memoireonline.com/10/12/6325/m_Mecanismes-d-alterations-des-materiaux-cimentaires-soumis-aux-milieus-fortement-agressifs13.html)

[11] <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/nouveau-guide-du-beton-et-de-ses-constituants-978221210231>

[12] <http://thesis.univ-biskra.dz/2295/3/Chapitre%2001.pdf>

[13] [http://www.academia.edu/25589436/Chapitre\\_III\\_Les\\_ajouts\\_min%C3%A9raux](http://www.academia.edu/25589436/Chapitre_III_Les_ajouts_min%C3%A9raux)

[14] <https://fr.scribd.com/doc/45089849/Influence-Des-Ajouts-Mineraux-Sur-Les-Resistances-Mecaniques>

[15] <http://thesis.univ-biskra.dz/2446/3/chapitre1.pdf>

**[16]** [http://www.metrologie-](http://www.metrologie-francaise.fr/publications/revue_francaise_metrologie/2015-01/RFM37-1504.pdf)

**francaise.fr/publications/revue\_francaise\_metrologie/2015-01/RFM37-1504.pdf**

**[17] Mhamed Adjoudj** « Effet des additions minérales et organiques sur le comportement rhéologique du béton » Université de Cergy Pontoise, 2015. Français. Le 22/08/ 2016

**[18] Rebih Zaitri, Madani Bederina, Fodil Dif, Youcef Guetaf** « Etude de l'influence des fines calcaires sur le comportement du béton formulé à base des granulats recyclés » Universitaires de Génie Civil, May 2015, Bayonne, France. Le 24/06/ 2015

**Annexe A**  
**Détermination des caractéristiques physique**  
**Des matériaux.**

**Les modes opératoires**

- **La Masse volumique apparent**

On pèse le récipient vide

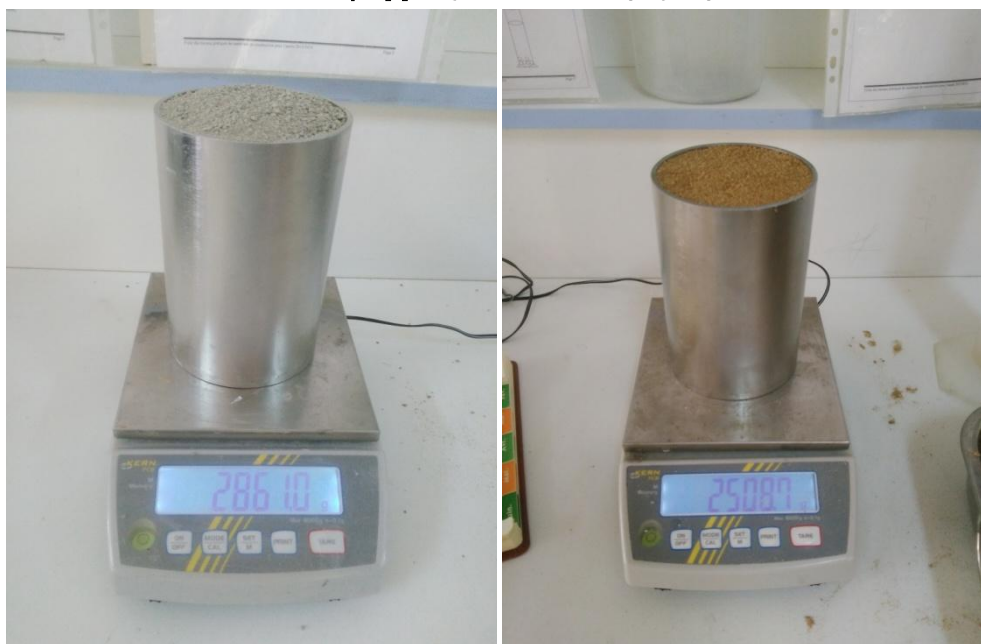
On remplit le récipient avec le granulat à raz bord .on s'aidera de l'entonnoir pour verser le granulat sans déborder, il est muni d'une sorte de vanne pour maitriser le débit de granulat qu'on verse.

Avec la règle à araser, on araser de sorte à remplir exactement le récipient de 1L

On pèse l'ensemble, récipient + granulat

La masse volumique apparente de granulat sera calculé avec cette formule :

$$\rho_{app} = (m_1 + m_2 + m_3 / 3) * 1 / V$$



**Fig. A-1** Détermination de la masse volumique apparente des sables.

- **Détermination de la masse volumique absolue du ciment selon la norme NF P 18-558**

Peser le pycnomètre vide  $m_0$ .

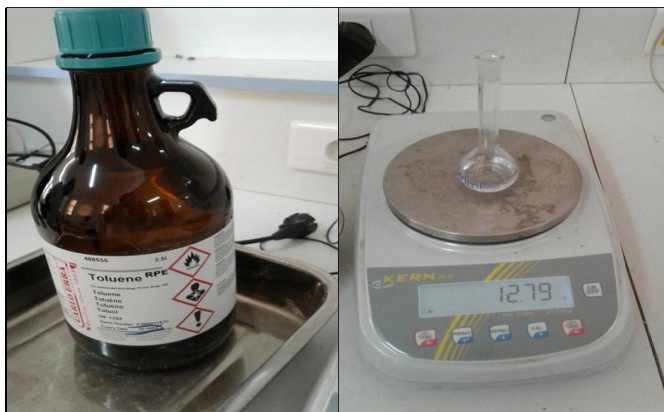
Peser le pycnomètre rempli de toluène jusqu'au trait repère soit  $m_1$ .

Peser 10 g de ciment (chaux) soit  $m_2$ .

Introduire le corps dans le toluène après avoir vide le pycnomètre à moitié.

Eliminer l'air et remplir de toluène au trait repère peser  $m_3$ .

Masse du toluène déplacé correspond au volume du corps :  $m_T = m_1 + m_2 - m_3$



**Fig. A-2.** Utilisation d'un pycnomètre et de la solution Toluène pour la détermination de la masse volumique absolue du ciment.

Volume du toluène déplacé :

$V_t = m_t / \rho_t$  ( $\rho_t$  : masse spécifique du toluène)

Masse spécifique de l'échantillon :

$\rho_c = m_2 / V_t$

- **Détermination de la masse volumique absolue du calcaire selon la norme NF P 18-558**

Peser le pycnomètre vide :  $m_1 = 272.5g$

Prendre environ de 25g de filler calcaire séché.

Verser cette quantité du sol dans le pycnomètre

Peser le pycnomètre contenant le fillers calcaire :  $m_2 = 25g$

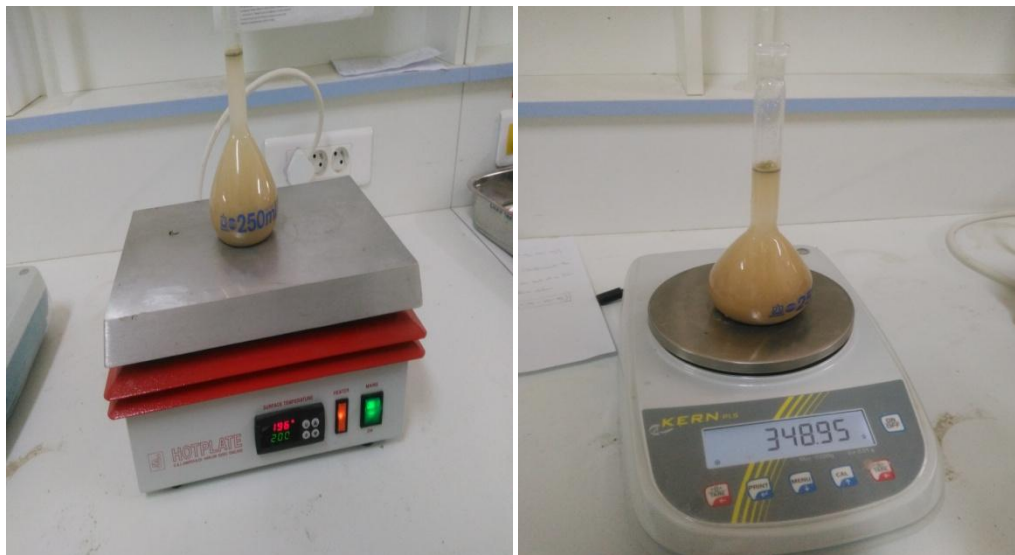
Remplir le pycnomètre à moitié avec de l'eau distillée et placer le tout sur la plaque chauffante et laisser chauffer pour dégager les bulles d'air.

Arrêter le chauffage quand l'eau est portée à ébullition et laisser refroidir.

Compléter avec de l'eau distillée jusqu'à la graduation  $250cm^3$ .

Peser le nouveau pycnomètre (avec le sol et l'eau) :  $m_3 = 1284.08g$

Vider le pycnomètre, remplir avec l'eau jusqu'à la graduation  $250cm^3$  et peser le :  $m_4 = 1268.12g$ .



**Fig. A-3.** Détermination de la masse volumique absolue de calcaire.

- **La surface spécifique Blaine du ciment**

Placer grille + papier filtre + ciment (quantité) + papier filtre

Tasser et ôter le piston.

Vérifier le niveau du liquide : il doit arriver au trait inférieur, si nécessaire, parfaire ce niveau.

Placer la cellule sur l'ajutage .la jonction doit être étanche (très mince couche de vaseline )s'assurer de l'étanchéité de l'ensemble (boucher la cellule avec le pouce, aspirer avec la poire pour faire monter le liquide aux environs du trait supérieur ,si on ferme le robinet , le niveau doit rester constant ).

L'étanchéité étant réalisée, aspirer le liquide jusqu'à ce qu'il atteigne le trait supérieur, et fermer le robinet.

L'air traverse le ciment, et le niveau du liquide baisse :

Chronométrer le temps que met le liquide à passer



**Fig. II-4.** Le piston.

du 2<sup>e</sup> trait au 3<sup>e</sup> trait, soit  $t$  (en secondes).

La moyenne des temps résultant de 3mesures consécutives.

Noter la température.

**Fig. A-4.** Surface spécifique.

- **Analyse granulométrique**

L'analyse granulométrique se déroule en trois phases :

Prélever un échantillon de matériaux et le préparer pour l'analyse :

le quartage Procéder à l'examen du matériau : étuvage, tamisage, refus...

Tracer la courbe granulométrique du matériau.



**Fig. A-5.** *Colonne de tamis.*

- **Équivalent de sable**

Remplissage de la solution lavant jusqu'au premier trait.

Pesée de 120g de sable sec.

Imbibition du sable pendant 20 minutes dans la solution lavant.

Éprouvette secouée (60 cycles en 30 secondes).

Lavage du sable avec la solution lavant jusqu'au trait supérieur.

Début de la décantation

Mesure de la hauteur de sable  $h_2$  et de la hauteur  $h_1$ .



**Fig. A-6.** *Essai d'équivalent de sable.*

## Annexe B

### *Détermination des essais à l'état frais.*

#### Les modes opératoires

- *Maniabilité*

Lorsque le maniabilimètre est rempli, l'essai peut commencer :

Mettre le bouton du boîtier de commande sur ON : le microcontact de la cloison amovible est armé.

Pour commencer l'essai, soulever la trappe et déclencher un chronomètre. Le fait d'opter la trappe commande automatiquement la mise en route du moteur.

Arrêter le chronomètre lorsque le niveau du mortier ne soit pas parallèle au trait repère.



**Fig. B-1.** *Maniabilimètre*

#### *L'aire occlus*

Mise en place du mortier dans la cuve

A la fin du remplissage, fermer les deux vannes

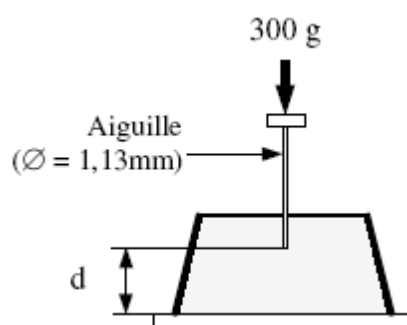
Tapoter légèrement le manomètre et l'aéromètre pour s'assurer que la pression ne change pas.



Appuyer sur le bouton poussoir vert quelques secondes jusqu'à ce que les pressions entre cuve et chambre de pression s'équilibrent.  
 Le manomètre indique alors directement en pourcentage le volume d'air occlus dans le mortier.  
 A la fin de la mesure, appuyer simultanément sur les touches noir et verte pour faire chuter la pression.  
 Ouvrir les vannes et rajuster le niveau de l'eau.  
 Répéter la mesure.

- **Temps de prise du ciment**

Une fois la pâte à consistance normale obtenu, on procède au changement de la sonde de Vicat et on l'amène à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse).



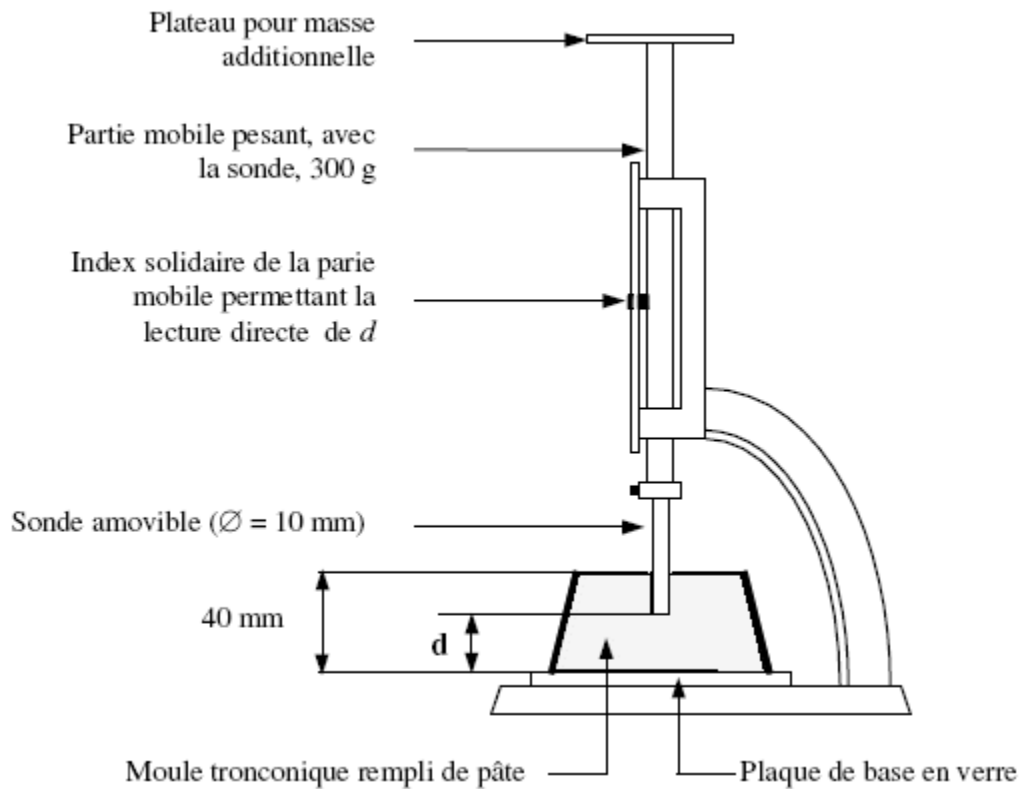
**Fig. B-2.** *L'appareil de Vicat.*

L'aiguille alors s'enfonce dans la pâte. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente),  
 Relever la distance  $d$  séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.  
 Recommencer l'opération à des intervalles de temps convenablement espacés (10-15mn)  
 Jusqu'à ce que  $d=4\text{mm}\pm 1\text{mm}$ .

Cet instant mesuré à 5mn près est le temps de début de prise pour le ciment testé.  
 Il est recommandé de reporter les résultats obtenus sur un graphique (minimum 3 point) en vue de déterminer le temps de début de prise avec précision.

- **Essai de consistance**

La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs. Il faut enlever l'excès de pâte par un mouvement de va-et-vient effectué une truelle maintenue perpendiculairement à la surface supérieure du moule.  
 Puis l'ensemble est placé sur la platine de l'appareil de Vicat.



**Fig. B-3.** *L'appareil de Vicat.*

La sonde est amenée à la surface de l'échantillon et relâchée sans élan (sans vitesse). La sonde alors s'enfoncé dans la pate. Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30 s d'attente), relever la distance  $d$  séparant l'extrémité de l'aiguille de la plaque de base.

La pate sera à consistance normale si  $d=6\text{mm} \pm 1\text{mm}$  :

Si  $d > 7\text{mm}$  : il n'y a pas assez d'eau,

Si  $d < 5\text{mm}$  : il y a trop d'eau.

**Annexe C**  
**Les résultats des essais destructifs.**

**Tab. C-1.**Resistance à la traction par flexion et à la compression avec un rapport  
E/L=0.45.

E/L=0.45	Témoïn		10%		20%		30%	
	Flexion 0,45	Compression 0,45	Flexion 0,45	compression 0,45	Flexion 0,45	Compression 0,45	Flexion 0,45	Compression 0,45
7	3,38	23	3,86	27,02	3,75	27,75	3,19	24,64
14	4,72	34,55	5,18	39,47	4,99	38,27	4,62	34,15
28	5,5	40,92	5,96	45,75	5,64	43,16	5,19	39,38
60	5,99	43,92	6,1	47,3	5,84	44,52	5,33	41,16

**Tab. C-2.**Resistance à la traction par flexion et à la compression avec un rapport  
E/L=0.55.

E/L=0.55	Témoïn		10%		20%		30%	
	Flexion 0,55	Compression 0,55	Flexion 0,55	Compression 0,55	Flexion 0,55	Compression 0,55	Flexion 0,55	Compression 0,55
7	3,13	20,39	3,37	24,55	3,35	22,92	3,19	20,12
14	4,05	32,57	4,49	36,07	4,43	36,97	4,15	31,98
28	4,82	38,58	5,28	42,55	5,12	41,56	4,72	37,08
60	5,2	41,33	5,4	44,18	5,29	43,17	4,9	38,76

**Tab. C-3.**Resistance à la traction par flexion et à la compression avec un rapport  
E/L=0.65.

E/L=0.65	Témoïn		10%		20%		30%	
	Flexion 0,65	Compression 0,65	Flexion 0,65	Compression 0,65	Flexion 0,65	Compression 0,65	Flexion 0,65	Compression 0,65
7	2,76	20,23	2,94	22,48	3,02	21,87	2,89	19,2
14	3,46	29,56	3,78	32,73	3,68	31,61	3,45	30,84
28	3,88	35,62	4,16	38,01	3,99	35,96	3,77	36,18
60	4,09	38,26	4,34	39,67	4,09	37,33	3,96	37,86

Tab. C-4. La vitesse du son longitudinale et transversale du mortier témoin.

Matériau	Age (jour)	E/L	Poids volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Vitesse du son dans le sens longitudinal (m/s)	Vitesse du son dans le sens transversal (m/s)
Mortier Témoin	7	0.45	2.22	4248.3	3967.1
		0.55	2.15	4153.6	3870.6
		0.65	2.09	4062.9	3777.7
	14	0.45	2.18	4281.3	3991.3
		0.55	2.12	4186.6	3898.0
		0.65	2.06	4095.1	3817.9
	28	0.45	2.16	4332.4	4080.4
		0.55	2.09	4238.2	3982.6
		0.65	2.03	4144.0	3885.5
	60	0.45	2.12	4341.0	4224.1
		0.55	2.07	4249.5	4163.7
		0.65	2.01	4153.9	4066.8

Tab. C-5. La vitesse du son longitudinale et transversale du mortier avec 10% de fillers calaire.

Matériau	Age (jour)	E/L	Poids volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Vitesse du son dans le sens longitudinal (m/s)	Vitesse du son dans le sens transversal (m/s)
Mortier avec 10 % de F.C	7	0.45	2.25	4326.7	3996
		0.55	2.19	4234.5	3909
		0.65	2.13	4143.6	3814
	14	0.45	2.23	4359.2	3999
		0.55	2.16	4264.0	3934
		0.65	2.10	4174.7	3840
	28	0.45	2.19	4413.1	4123
		0.55	2.12	4315.0	4019
		0.65	2.07	4221.2	3933
	60	0.45	2.16	4423.7	4211
		0.55	2.11	4330.4	4112
		0.65	2.05	4235.1	3997

**Tab. C-6.** La vitesse du son longitudinale et transversale du mortier avec 20% de fillers calcaire.

Matériau	Age (jour)	E/L	Poids volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Vitesse du son dans le sens longitudinal (m/s)	Vitesse du son dans le sens transversal (m/s)
Mortier avec 20 % de F.C	7	0.45	2.309	4184.5	3889.4
		0.55	2.239	4089.4	3795.7
		0.65	2.178	3997.6	3704.0
	14	0.45	2.282	4221.5	3931.3
		0.55	2.213	4124.1	3822.6
		0.65	2.152	4031.9	3735.0
	28	0.45	2.253	4269.5	4075.2
		0.55	2.182	4176.0	3916.1
		0.65	2.124	4081.7	3815.6
	60	0.45	2.217	4278.9	4089.9
		0.55	2.160	4185.6	3998.4
		0.65	2.101	4090.8	3897.8

**Tab. C-7.** La vitesse du son longitudinale et transversale du mortier avec 30% de fillers calcaire.

Matériau	Age (jour)	E/L	Poids volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Vitesse du son dans le sens longitudinal (m/s)	Vitesse du son dans le sens transversal (m/s)
Mortier avec 30 % de F.C	7	0.45	2.354	3965.0	3657.1
		0.55	2.283	3873.3	3559.3
		0.65	2.224	3779.1	3467.0
	14	0.45	2.325	4006.3	3692.3
		0.55	2.256	3906.7	3591.9
		0.65	2.198	3815.9	3506.8
	28	0.45	2.297	4053.4	3776.1
		0.55	2.226	3961.1	3685.0
		0.65	2.171	3862.0	3587.7
	60	0.45	2.264	4064.7	3849.4
		0.55	2.201	3967.0	3750.2
		0.65	2.149	3870.1	3657.6