

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI OUM EL-BOUAGHI  
FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES APPLIQUEES  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

N°D'ORDRE :.....

N°DE SERIE :.....

MEMOIRE PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER  
EN GENIE CIVIL

OPTION : MATERIAUX

INTITULE :

**INFLUENCE DES ADDITIONS LOCALES POUR L'AMELIORATION DES  
PROPRIETES MECANIKES DES BETONS A JEUNES AGES.**

PRESENTE PAR:

Mr.: **Abassi Tarek**

SOUTENU LE :.....

DEVANT LE JURY :

PRESIDENT Mr. Khiari Abdelkader (PROF) - UNIVERSITE Oum El Bouaghi  
RAPPORTEUR Mr. Boudchicha Abdelaziz (MCA) - UNIVERSITE Oum El Bouaghi  
EXAMINATEUR Mr. Arabi Noureddine (PROF) - UNIVERSITE Annaba  
EXAMINATEUR Mr. Boudaoud Zeineddine (MCA) - UNIVERSITE Oum El Bouaghi

## *DEDICACES*

*En signe de respect et de reconnaissance,*

*Je dédie ce modeste travail à*

*La mémoire de mon père*

*Ma chère mère pour sa patience et ses sacrifices.*

*A mes frère et mes deux sœurs, à*

*Tous mes amis (es) et mes collègues de travail à*

*la DFP d'Oum Bouaghi et de l'IFP Annaba,*

*Mes collègues de promotion, et à tous*

*Personne ayant contribué à ce travail de près ou*

*de loin.*

## Remerciements

*Au terme de ce travail, je tiens à remercier en premier lieu DIEU pour m'avoir donné la volonté et la patience pour achever ce mémoire.*

*J'adresse ma profonde gratitude à mon promoteur **Mr. A. BOUDCHICHA**, Maître de Conférences à l'Université d'Oum Bouaghi, qui a dirigé ce mémoire. Je lui dois mes premiers pas dans la recherche. Sa disponibilité et ses conseils m'ont été précieux pour mener à bien ce travail.*

*Je remercie très vivement **Mr. Khiari Abdelkader**, Professeur à l'Université d'Oum Bouaghi, de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.*

*J'exprime également ma grande reconnaissance au **Mr. Boudaoud Zeineddine**, Maître de Conférences à l'Université de d'Oum Bouaghi et **Mr. Arabi Noureddine**, Professeur à l'université d'Annaba, pour l'honneur qu'ils m'ont fait et d'avoir accepté de faire partie du jury de soutenance en qualité d'examineur.*

*Je tien a remercie le personnel des services techniques des laboratoires des laboratoires **LNHC** et Le laboratoire de la cimenterie de **Tébessa** pour Leur patiente et Disponibilité et pour m'aide à réalisé mes essais*

*Je n'oublie pas de remercier aussi l'ensemble du corps enseignement et administratif du département de Génie Civil de l'université d'Oum Bouaghi. Je remercie également les collègues de ma promotion.*

## **Résumé :**

*L'utilisation des additions minérales dans les formulations des mortiers et bétons peut présenter un bénéfice pour l'amélioration des caractéristiques rhéologique et mécaniques ainsi pour l'économie en substituant en masse du ciment par des additions à faible cout. Ce sujet porte sur l'étude de l'effet des additions calcaires, de l'ENG Khroub de CONSTANTINE, à différentes finesse F15, UF10 et UF5 et à des taux de substitution de 10, 20, 30 et 40% en masse de deux ciments différents, CEM II 42,5 et CEM I 42,5 R. L'étude a porté sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers, puis validé sur des formulations de béton en utilisant les types et quantités optimales d'additions calcaires avec le ciment le plus adapté à l'obtention des résistances à courts termes intéressantes. L'utilisation de 10% d' additions L5(UF5) de finesse égale à  $4231 \text{ cm}^3/\text{g}$  a permis d'atteindre des résistances à courts termes intéressantes sans altérer la résistance en compression à 28 jours, ce qui peut orienter leur utilisation dans le cas de la préfabrication et de la précontrainte. L'utilisation de 20 % de fillers L5 et 10% de fillers L10 peut être envisagée dans le cas des bétons usuels.*

**Abstract:**

*The use of mineral additives in the formulations of mortars and concretes can have a benefit for improving rheological and mechanical characteristics and the economy by substituting mass of cement additions low cost. This topic focuses on the study of the effect of limestone additions, ENG Khroub of Constantine at different F15 finesse, UF10 and UF5 and substitution rates of 10, 20 , 30 and 40 wt% of two different cements CEM II 42.5 and CEM I 42.5 R. The study focused on the rheological and mechanical properties of mortars and validated on concrete formulations using the types and quantities optimal cement with limestone additions most suitable for obtaining resistance to short term interest. The use of 10% of additions L5 (UF5 ) finesse equal to 4231 cm<sup>3</sup>/ga achieved resistance to short term interest without altering the compressive strength at 28 days , which can guide their use in the case of prefabrication and preload . The use of 20% filler and 10% L5 L10 fillers can be seen in the case of conventional concrete*

## ملخص

يمكن استخدام الإضافات المعدنية في تركيبات من الملاط والخرسانة يكون لها فائدة لتحسين الخصائص الريولوجية والميكانيكية والاقتصاد عن طريق استبدال كتلة من الإضافات الأسمنت بتكلفة منخفضة. ويركز هذا الموضوع على دراسة تأثير الإضافات الحجر الجيري ، ENG الخروب قسطنطينة في مختلف الجودة ، F15 UF10 و UF5 ومعدلات إحلال 10 ، 20 ، 30 و 40 ٪ بالوزن لنوعين مختلفين من الأسمنت CEM 42.5 I و II . وركزت الدراسة على الخواص الريولوجية والميكانيكية للملاط والتحقق من صحتها بشأن تركيبات خرسانة وذلك باستخدام نوع وكميات الاسمنت الأمثل مع الإضافات الحجر الجيري الأكثر ملائمة للحصول على فائدة المقاومة قصيرة الأجل. استخدام 10 ٪ من الإضافات UF5 (L5) بمساحة حبيبية تساوي 4231 cm<sup>3</sup>/g تحققت الفائدة من اجل قوة الضغط قصيرة الأجل دون تغيير قوة الضغط في 28 يوما ، والتي يمكن توجيه استخدامها في حالة من الاجتهادات المسبقة و التحميل المسبق . استخدام 20 ٪ من الإضافات L5 و 10 ٪ من L10 يمكن أن يعطي فائدة معتبرة في حالة الخرسانة التقليدية .

# Table des matières

Table des matières .....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	IX
Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I Le ciment portland</i>	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Minéralogie du ciment Portland .....	5
I.3 Hydratation du ciment portland .....	9
I.3.1 Les théories d'hydratation .....	10
I.3.2 Hydratation du silicate tricalcique $C_3S$ .....	11
I.3.3 Hydratation du silicate bicalcique $C_2S$ .....	12
I.3.4 Hydratation de l'aluminate tricalcique $C_3A$ .....	13
I.3.5 Hydratation de l'aluminoferrite tetracalcique $C_4AF$ .....	14
I.4 quelques paramètres influent sur les résistances à jeunes âges de mortiers et bétons. ....	14
I.4.1 Notion de résistance à court terme .....	14
I.4.2 Influence de l'hydratation des phases minérales du ciment sur les résistances à courts termes.....	15
I.4.3 Influence de la température de murissement du béton sur les résistances à jeunes âges des bétons .....	16
I.4.4 Influence rapport E/C sur les résistances à jeunes âges des bétons .....	17
I.4.5 Influence du dosage en ciment sur les résistances à jeunes âges des bétons .....	18
I.4.6 Influence du type et de la classe du ciment sur les résistances à jeunes âges des bétons .....	19
I.4.7 Influence de l'utilisation des accélérateurs de prise et de durcissement sur les résistances à jeunes âges des bétons .....	20
I.4.8 Influence du traitement thermique sur les résistances à jeunes âges des bétons .....	21
I.5 Synthèse .....	23

## *Chapitre II Effets des additions minérales sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des matrices cimentaires*

II.1 Introduction .....	24
II.2 Effets des additions minérales sur les matrices cimentaires .....	26
L'effet granulaire ou effet filler.....	27
L'effet physico-chimique et microstructural .....	31
L'effet chimique .....	32
II.4.3 Action des additions sur les propriétés des mortiers et des bétons .....	34
II.3.1 La fumée de silice .....	34
II.3.2 Les cendres volantes .....	36
II.3.3 La pouzzolane .....	39
II.3.4 Le laitier de haut fourneau .....	40
II.3.5 Action des fillers calcaires .....	41
II.4 Synthèse .....	47

## *Chapitre III Caractérisation des matériaux utilisés et différents essais effectués*

III.1 Introduction .....	48
III.2 Caractérisation des matériaux utilisés .....	49
III.2.1 Méthodes utilisées pour la caractérisation .....	49
III.2.1.1 Mesure de La finesse .....	49
III.2.1.2 La composition chimique et minéralogique.....	54
III.2.1.3 Caractéristiques physiques des granulats utilisés.....	57
III.3 Programme expérimental .....	59
III.4 Les différents essais effectués .....	60
III.4.1 Essais sur mortier .....	60
Essai de consistance par la table à secousses .....	61
Résistance en compression .....	62
III.4.2 Essais sur béton .....	64
Affaissement au cône d'Abrams .....	64
Résistance en compression .....	65
III.5 Synthèse .....	66

## *Chapitre IV Résultats et discussions*

IV.1 Introduction .....	67
IV.2 Effet des additions calcaires sur les mortiers avec E/C Constant.....	68
IV.2.1 Effet des fillers calcaires sur la maniabilité des mortiers .....	68
IV.2.2 Effet des fillers calcaires sur les résistances à la compression des mortiers à E/C constant.....	72
IV.2.2.1 Mortiers de références .....	73
IV.2.2.2 Mortiers à base de ciment C1 et fillers calcaires .....	74
IV.2.2.3 Mortiers à base de ciment C2 et fillers calcaires .....	82
IV.3 Effet des additions calcaires sur les propriétés des mortiers à maniabilité constante .....	89
IV. 3.1 Effet des fillers calcaires sur le besoin en eau des mortiers M3 à maniabilité constante .....	90
IV. 3.2 Effet des fillers calcaires sur les résistances en compression des mortiers à base de ciment C2 à maniabilité constante .....	91
IV.4 Effet des additions calcaires sur les bétons à maniabilité constante .....	100
IV.4.1 Effet des additions calcaires sur le besoin en eau des bétons .....	101
IV.4.2 Effet des additions calcaires sur la résistance en compression des bétons .....	102
IV.5 Synthèse.....	107
Conclusion générale.....	111
Références bibliographiques.....	116

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> Schéma du procédé de Fabrication du ciment portland .....	5
<b>Figure I.2</b> Microphotographie d'un clinker .....	6
<b>Figure I.3</b> CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#) .....	11
<b>Figure I.4</b> Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton .....	13
<b>Figure I.5</b> Processus de durcissement du béton .....	14
<b>Figure I.6</b> Influence de la teneur en C3S sur le dégagement de chaleur du ciment aux premières heures d'hydratation .....	15
<b>Figure I.7</b> Influence de la teneur en C3A sur le dégagement de chaleur aux premières heures d'hydratation .....	15
<b>Figure I.8</b> Influence de la température du murissement sur la résistance à la compression d'un béton .....	16
<b>Figure I.9</b> Influence de la température du murissement sur la résistance à la compression d'un béton à 16 et 20 heures .....	17
<b>Figure I.10</b> Influence du rapport E/C sur la résistance du béton .....	17
<b>Figure I.11</b> Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression au jeune âge du béton .....	18
<b>Figure I.12</b> Influence du dosage en ciment sur les résistances en compression à courts termes des bétons .....	18
<b>Figure I.13</b> Influence de la nature du ciment sur les résistances en compression à courts termes d'un béton .....	19
<b>Fig I.14</b> Résistances mécaniques de deux bétons ne différant que par le type de ciment utilisé .....	20
<b>Fig I.15</b> Influence d'un accélérateur de prise sur les résistances en compression à courts termes d'un mortier .....	20

<b>Fig I.16</b> Résistance en compression à courts termes de bétons avec et sans accélérateur de prise	21
<b>Fig I.17</b> Influence de la température de cure et de préchauffage sur le développement des résistances en compression à courts termes des bétons	22
<b>Figure II.1</b> Variation de la demande en superplastifiant pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1 avec des mélanges à même consistance en fonction du taux substitution de ciment	29
<b>Figure II.2</b> Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvantes en fonction du dosage en additions minérales	30
<b>Figure II.3</b> Besoin en eau des pâtes de ciment en fonction de la quantité d’addition	30
<b>Figure II.4</b> Influence du type de ciment et de la quantité d’addition sur la résistance en compression des bétons	33
<b>Figure II.5</b> Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d’un mortier	35
<b>Figure II.6</b> Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers en fonction de la teneur en fumée de silice pour différents rapports eau/liant	36
<b>Figure II.7</b> Variation de l’écoulement en fonction du taux des additions	37
<b>Figure II.8</b> Réduction de la demande en eau apportée par l’introduction de deux cendres volantes dans une formulation de béton	38
<b>Figure II.9</b> Variation de la résistance à la compression en fonction de l’âge pour les deux taux de substitution de cendre volant	39
<b>Figure II.10</b> Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression	41
<b>Figure II.11</b> Variation de l’écoulement en fonction du taux des additions	42
<b>Figure II.12</b> Variation de la demande en superplastifiant des mortiers C1 et C2 en fonction de la finesse de l’addition	43
<b>Figure II.13</b> Les résistances en compression de colles de ciment contenant de différentes quantités de CaCO <sub>3</sub>	44
<b>Figure II.14</b> Variation des résistances en compression des pâtes cimentaires en fonction de la teneur en CaCO <sub>3</sub> à différentes échéances	44
<b>Figure II.15</b> Variation de la résistance à la compression en fonction de l’âge Pour les deux taux de substitution de filler calcaire	45
<b>Figure II.16</b> Evolution de la résistance à la compression en fonction de l’âge des mortiers contenant le calcaire	45
<b>Figure II.17</b> Effet de la substitution du ciment par les additions sur les résistances en compression à 07 et 28 jours	46

<b>Figure III.1</b> Tamis électrique .....	50
<b>Figure III.2</b> Appareil Blaine .....	51
<b>Figure III.3</b> Diffraction par rayon x (fluorescence x) .....	54
<b>Figure III.4</b> Mesure de l'étalement pour les mortiers à l'état frais .....	62
<b>Figure III.5</b> Bac de conservation d'éprouvettes à température contrôlée .....	63
<b>Figure III .6</b> Machine de compression .....	63
<b>Figure III.7</b> Ecran d'affichage de la machine de compression .....	65
<b>Figure IV.1</b> Etalement sur la table a secousse des mortiers témoins M1 et M2 à E/C=0,5 .....	69
<b>Figure IV.2</b> Variation de l'étalement des mortiers C1 en fonction du taux de substitution du ciment par les fillers calcaires à E/C=0,5 .....	71
<b>Figure IV.3</b> Variation de l'étalement des mortiers à base de ciment C2 en fonction du taux de substitution du ciment par les fillers calcaires à E/C=0,5.....	71
<b>Figure IV.4</b> Evolution des résistances en compression des mortiers à base des ciments C1 et C 2 sans additions à E/C=0,5 .....	73
<b>Figure IV.5</b> Evolution des résistances en compression des mortiers M1 avec les trois additions calcaires à 10% du taux de substitution du ciment C1 (E/C=0,5) .....	76
<b>Figure IV.6</b> Evolution des résistances en compression des mortiers M1 avec les trois additions calcaires à 20% du taux de substitution du ciment C1 (E/C=0,5) .....	76
<b>Figure IV.7</b> Evolution des résistances en compression des mortiers M1 avec les trois additions calcaires à 30% du taux de substitution du ciment C1 (E/C=0,5) .....	77
<b>Figure IV.8</b> Evolution des résistances en compression des mortiers M1 avec les trois additions calcaires à 40% du taux de substitution du ciment C1 (E/C=0,5) .....	77
<b>Figure IV.9</b> Variation de la résistance en compression à 1 jour des mortiers M1 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à E/C=0,5.....	78
<b>Figure IV.10</b> Variation de la résistance en compression des mortiers M1 à 2 jours en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à E/C=0,5.....	79
<b>Figure IV.11</b> Variation de la résistance en compression des mortiers M1 à 3 jours en fonction	

du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à E/C=0,5 .....	80
<b>Figure IV.12</b> Variation de la résistance en compression des mortiers M1 à 7 jours en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à E/C=0,5 .....	81
<b>Figure IV.13</b> Variation de la résistance en compression des mortiers M1 à 28 jours en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à E/C=0,5 .....	81
<b>Figure IV.14</b> Evolution des résistances en compression des mortiers M2 avec les trois additions calcaires à 10% du taux de substitution du ciment C2 (E/C=0,5) .....	83
<b>Figure IV.15</b> Evolution des résistances en compression des mortiers M2 avec les trois additions calcaires à 20% du taux de substitution du ciment C2 (E/C=0,5) .....	84
<b>Figure IV.16</b> Evolution des résistances en compression des mortiers M2 avec les trois additions calcaires à 30% du taux de substitution du ciment C2 (E/C=0,5) .....	84
<b>Figure IV.17</b> Evolution des résistances en compression des mortiers M2 avec les trois additions calcaires à 40% du taux de substitution du ciment C2 (E/C=0,5) .....	85
<b>Figure IV.18</b> Variation de la résistance en compression à 1 jour des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à E/C=0,5 .....	86
<b>Figure IV.19</b> Variation de la résistance en compression à 2 jours des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à E/C=0,5 .....	86
<b>Figure IV.20</b> Variation de la résistance en compression à 3 jours des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à E/C=0,5 .....	87
<b>Figure IV.21</b> Variation de la résistance en compression à 7 jours des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à E/C=0,5 .....	88
<b>Figure IV.22</b> Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à E/C=0,5 .....	88
<b>Figure IV.23</b> Variation du besoin en eau des mortiers à base de ciment C2 avec fillers calcaires à maniabilité constante .....	91
<b>Figure IV.24</b> Evolution de la résistance en compression des mortiers M3 avec 10 % de fillers calcaires à maniabilité constante .....	92
<b>Figure IV.25</b> Evolution de la résistance en compression des mortiers M3 avec 20 % de fillers calcaires à maniabilité constante .....	93

<b>Figure IV.26</b> Variation de la résistance en compression des mortiers M3 avec 30 % de fillers calcaires à maniabilité constante .....	94
<b>Figure IV.27</b> Variation de la résistance en compression des mortiers M3 avec 40 % de fillers calcaires à maniabilité constante .....	95
<b>Figure IV.28</b> Variation de la résistance en compression à 1 jour des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante.....	96
<b>Figure IV.29</b> Variation de la résistance en compression à 02 jours des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante .....	96
<b>Figure IV.30</b> Variation de la résistance en compression à 03 jours des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante .....	97
<b>Figure IV.31</b> Variation de la résistance en compression à 07jours des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante .....	98
<b>Figure IV.32</b> Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante .....	98
<b>Figure IV.33</b> Variation du besoin en eau des bétons en fonction de type et de taux de substitution du ciment par fillers calcaires à maniabilité constante .....	102
<b>Figure IV.34</b> Evolution de la résistance en compression des bétons avec 10% d'additions calcaires par rapport au béton témoin à maniabilité constante .....	103
<b>Figure IV.35</b> Evolution de la résistance en compression des bétons avec 20% d'additions calcaires par rapport au béton témoin à maniabilité constante .....	103
<b>Figure IV.36</b> Variation de la résistance en compression des bétons à 1 jour en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante .....	104
<b>Figure IV.37</b> Variation de la résistance en compression des bétons à 2 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante .....	104
<b>Figure IV.38</b> Variation de la résistance en compression des bétons à 3 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante .....	105
<b>Figure IV.39</b> Variation de la résistance en compression des bétons à 7 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante .....	106
<b>Figure IV.40</b> Variation de la résistance en compression des bétons à 28 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante .....	106



## *Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> Principales phases composent le ciment Portland .....	7
<b>Tableau I.2</b> Principaux minéraux du ciment Portland et leurs caractéristiques .....	8
<b>Tableau I.3</b> Les différents types de ciment .....	9
<b>Tableau III.1</b> Caractéristiques physiques des ciments.....	52
<b>Tableau III.2</b> Caractéristiques physiques des fillers .....	52
<b>Tableau III.3</b> composition chimique et minéralogique du ciment C1.....	55
<b>Tableau III.4</b> composition chimique et minéralogique du ciment C2.....	55
<b>Tableau III.5</b> Résistances garanties en compression sur mortier normalisé des ciments C1et C2.....	56
<b>Tableau III.6</b> Caractéristiques chimiques des additions calcaires .....	56
<b>Tableau III.9</b> Granulométrie du gravier 8/15.....	58
<b>Tableau III.8</b> Granulométrie du gravier 5/8.....	58
<b>Tableau III.7</b> Granulométrie du sable 0/5.....	58
<b>Tableau III.10</b> Caractéristique des granulats utilisés .....	59
<b>Tableau IV.1</b> Etalement des mortiers de références à base de ciment C1 et C2 (E/C constant).....	69
<b>Tableau IV.2</b> Etalement des mortiers à base de ciment C1 avec additions calcaires (E/C constant).....	70
<b>Tableau IV.3</b> Etalement des mortiers à base de ciment C2 avec additions calcaires (E/C constant) .....	70
<b>Tableau IV.4</b> Résistances à la compression des mortiers de références M1-0 et M2-0.....	73
<b>Tableau IV.5</b> Résistances en compression des mortiers M1 avec additions calcaires	75

<b>Tableau IV.6</b> Résistances à la compression des mortiers M2 avec additions calcaires .....	82
<b>Tableau IV.7</b> Besoin en eau à maniabilité constante des mortiers M3	90
<b>Tableau IV.8</b> variation des résistances à la compression des mortiers M3 avec additions calcaires à maniabilité constante	92
<b>Tableau IV.9</b> variation du besoin en eau des bétons avec additions calcaire à maniabilité constante.....	101
<b>Tableau IV.10</b> Variation des résistances en compression des bétons à base de ciment C2 avec addition calcaires à maniabilité constante.....	102

# *Introduction générale*

Le béton hydraulique est formé d'une pâte fluide (Liant, eau, air occlus) enrobant des granulats. En général, la résistance du mélange ne dépendra que de la résistance de la pâte durcie qui évolue en fonction du temps et de la température ambiante.

Pour obtenir à court et très court terme des résistances qui permettent de manipuler les pièces en béton préfabriquées sans nuire à leurs propriétés à long terme, il devient donc très important pour une entreprise de construction de connaître quand la résistance du béton devient suffisante en toute partie de l'ouvrage pour procéder au décoffrage ou au transfert de la précontrainte le plus rapidement possible en toute sécurité.

Pour atteindre ces objectifs, il est nécessaire pour les professionnels du béton de maîtriser les moyens qui permettent d'accélérer le durcissement du béton à court et très court terme.

Dans le cas de l'Algérie le problème de l'amélioration de la résistance a très jeune âge a déjà été abordé par beaucoup de chercheurs, et les résultats des récentes recherches ont montré que pour atteindre cet objectif, il faut passer par :

- L'emploi d'adjuvants accélérateurs de prise et de durcissement,
- L'emploi d'adjuvants superplastifiant
- L'emploi d'additions minérales à caractère pouzzolaniques.
- Le traitement thermique du béton.

En proposant de travailler sur l'influence des additions minérales locales utilisées en substitution d'une partie du ciment, sur les propriétés à jeunes âges des bétons destinés à la préfabrication, nous souhaitons contribuer à mettre en valeur l'apport de ces additions dans la technologie des bétons et permettre une réduction du bilan CO<sub>2</sub> des cimenteries.

Outre la réponse aux besoins technologiques évidents, l'utilisation des additions minérales dans les matériaux cimentaires constitue aussi un enjeu économique et un déficit scientifique pertinent.

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions interagissent dans le processus d'hydratation du ciment en modifiant la structure des produits hydratés et pour certaines peuvent

réagir chimiquement en milieu cimentaires pour former de nouveaux produits hydratés qui présentent un caractère liant supplémentaire.

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes, s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire.

- Un effet granulaire résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.

- Un effet physico-chimique et microstructural engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.

- un effet purement chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire (essentiellement présent dans le cas des additions du type II selon la norme EN 206-1), qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural.

## **PROBLEMATIQUE**

Ce sujet s'inscrit dans un objectif global de recherche qui traite l'amélioration des propriétés à jeunes âges des bétons destinés à la préfabrication. On se propose donc d'utiliser des matériaux locaux à faible coût qui existent en abondance dans notre pays et qui seront introduits dans les bétons en substitution du ciment, pour étudier l'influence de l'addition calcaire sur les propriétés à courts et très courts termes des mortiers et des bétons destinés à la préfabrication sans altérer leurs performances à moyen et long termes.

## **PLAN DE TRAVAIL**

- Etude bibliographique sur l'influence des additions minérales sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des pâtes, mortiers et bétons.
- Caractérisation des propriétés physico-chimiques et minéralogique des matériaux utilisées.
- Mettre en application une méthodologie expérimentale afin d'évaluer l'apport de chaque matériau entrant dans la formulation d'un mélange cimentaire.
- Application de la méthodologie d'essai défini précédemment pour l'amélioration des propriétés à court terme des mortiers.
- Essais expérimentaux

- Validation des résultats pour les bétons.
- Essais expérimentaux
- Analyse et commentaires

Pour maîtriser ce plan de travail nous diviserons notre mémoire en deux grandes parties comme suit :

**Partie 1 :** Etude bibliographique composée de deux chapitres :

- Chapitre I : Porte sur le ciment portland comme constituant principale de toute matrice cimentaire et les différents paramètres influents les caractéristiques rhéologiques et mécaniques des mélanges cimentaires.
- Chapitre II : Cette partie de recherche porte sur les additions minérales et leur influence sur les propriétés rhéologique et mécanique des mortiers et bétons.

**Partie 2 :** Etude expérimentale contient deux chapitres :

- Chapitre III : Les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés sont bien définies dans ce chapitre ainsi que le programme expérimental et les différents essais effectués.
- Chapitre IV : Suite à des essais effectués sur des mortiers et des bétons, une analyse des résultats obtenus sert à comprendre l'effet de la substitution de deux types de ciment par trois fillers calcaires à finesses différentes sur les mortiers et les bétons.

**Conclusion générale**

*Partie I*

*Etude*

*Bibliographique*

---

## Chapitre I Le ciment portland

### I.1 Introduction :

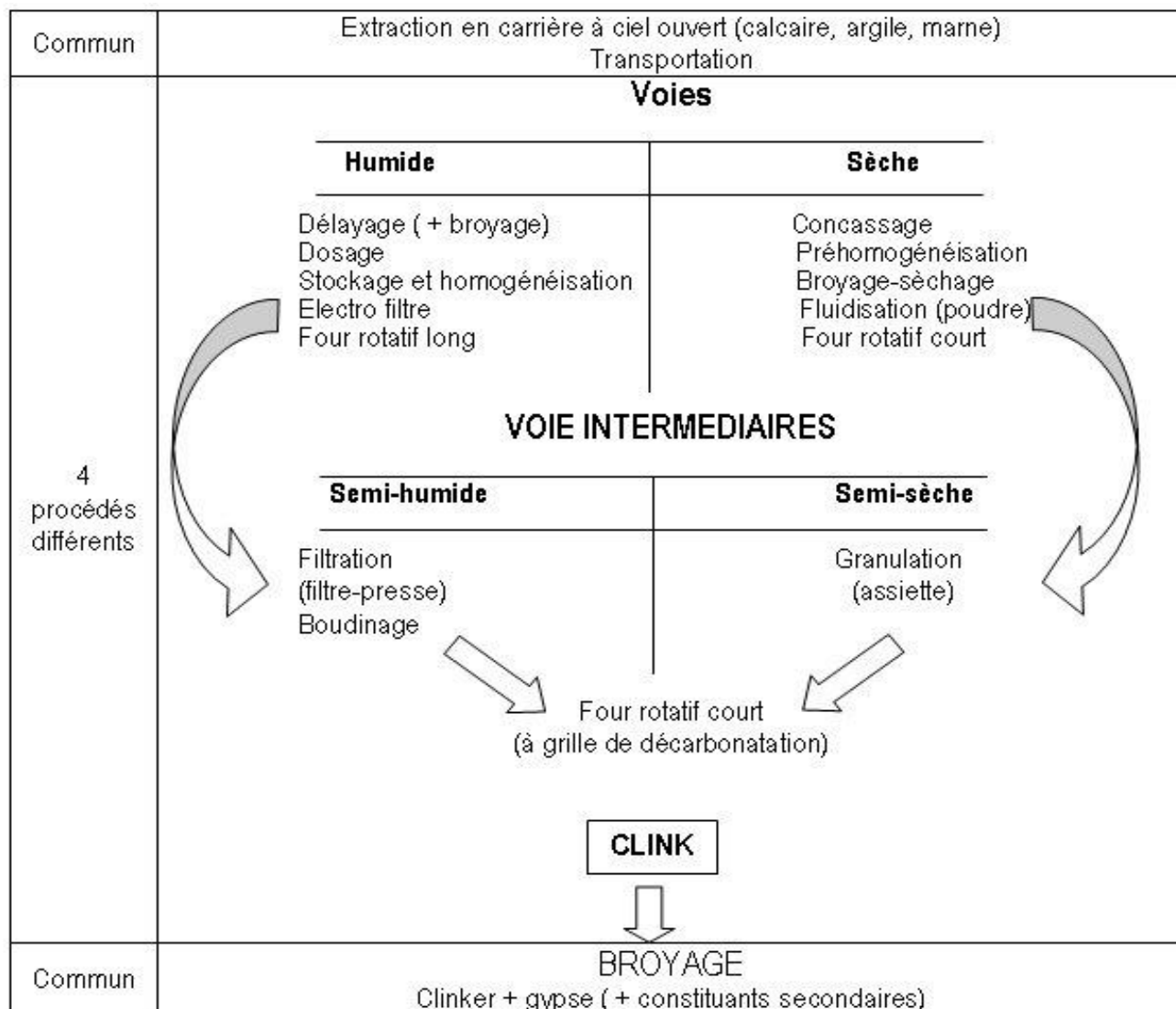
Dans la construction, le terme « ciment » est employé dans le cas des liants utilisés avec des pierres, des granulats, du sable, des briques, des blocs préfabriqués, etc. Les principaux constituants du ciment sont des composés à base de chaux, si bien que, dans le bâtiment et le génie civil, on parle de ciment d'origine calcaire. Les ciments utilisés dans la fabrication du béton ont la propriété de faire prise et de durcir sous l'eau en raison de leur réaction chimique avec celle-ci; ils sont d'ailleurs appelés liants hydrauliques.

Le ciment Portland (CEM I) est un liant hydraulique obtenu par mélange homogène d'argile et de calcaire, avec éventuellement d'autres matériaux contenant de la chaux, de la silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer, cuit à la température de clinkérisation puis broyé. Les différentes normes définissant le ciment Portland autorisent l'addition de gypse après la cuisson lors du broyage afin de contrôler la prise du ciment, à l'heure actuelle, d'autres matériaux peuvent également être ajoutés au ciment [1].

Le ciment Portland est fabriqué essentiellement à partir de matières calcaires, comme le calcaire ou la craie, et à partir d'alumine et de silice présente dans l'argile et les schistes argileux. Il est également possible d'utiliser des marnes, mélange de matières calcaires et argileuses [1].

Il existe 4 méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau [2]:

- 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).



**Figure I.1** Schéma du procédé de Fabrication du ciment portland [2]

**I.2 Minéralogie du ciment Portland**

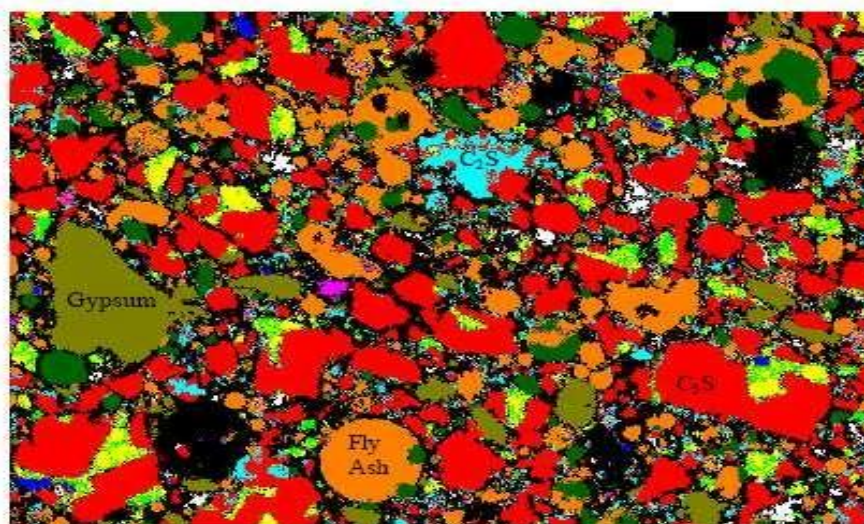
Le ciment Portland est constitué en masse, d’une certaine quantité de clinker et d’autres constituants minéraux tels que le laitier granulé de haut fourneau (S), les pouzzolanes naturelles (Z), les cendres volantes siliceuses(V), les cendres volantes calciques (W), les schistes calcinés (T), les calcaires (L), la fumée de silice (D) et des fillers (F).

Tous les ciments contiennent du clinker constitue le composé principal qui assure la fonction liante, grâce a laquelle le béton passe d’un état initiale liquide a un état finale rigide. [3]

Le ciment résulte du broyage d’un certain nombre de constituants. Le plus important étant le clinker formé de silicates et d’aluminates de chaux [4]. Dans la zone de clinkérisation du four, les éléments simples (CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se combinent pour donner les constituants minéraux suivants :

- Silicate tricalcique (C3S) :  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (Alite)
- Silicate bicalcique (C2S) :  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  (Belite)
- Aluminate tricalcique (C3A) :  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$
- Aluminoferrite tétracalcique (C4AF):  $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$  (Célite)

La micrographie du clinker peut être représentée par la figure I.2 [5]:



*Fig I.2 Microphotographie d'un clinker [5]*

Tel que :

- La couleur noire désigne la porosité,
- La couleur rouge, désigne le C3S,
- La couleur bleue clair désigne le C2S,
- La couleur verte claire désigne le C3A,
- La couleur verte foncée désigne le sulfate de calcium,
- La couleur jaune désigne le  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,
- La couleur blanche désigne le CaO.

Quatre composés, également appelés phases, sont habituellement considérés comme les principaux constituants du ciment et sont énumérés dans le **tableau 1.1** avec leur symbole abrégé. En effet, cette notation abrégée, utilisée par les chimistes de l'industrie du ciment, décrit chaque oxyde par une lettre :  $\text{CaO} = \text{C}$ ;  $\text{SiO}_2 = \text{S}$  ;  $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$  et  $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$ . De la même façon,  $\text{H}_2\text{O}$  dans le ciment hydraté est désigné par H et SO, par S [1].

**Tableau I.1** Principales phases composent le ciment Portland [1]

Composé	Composition	Abréviation
Silicate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicate bicalcique	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminate tricalcique	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrite tétracalcique	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Les proportions respectives moyennes de ces différentes phases, pour le ciment portland, sont en moyenne de : 50 à 70 % pour le  $\text{C}_3\text{S}$  ; 5 à 25 % pour le  $\text{C}_2\text{S}$  ; 2 à 12 % pour le  $\text{C}_3\text{A}$  ; 0 à 15 % pour le  $\text{C}_4\text{AF}$ .

Les proportions de ces phases sont déterminées en fonction des formules de Bogue, comme suit [3]:

- $\text{C}_3\text{S} = 4.07\text{C} - 7.60\text{S} - 6.72\text{A} - 1.43\text{F}$ .
- $\text{C}_2\text{S} = 8.60\text{S} + 1.08\text{F} + 5.07\text{A} - 3.07\text{C}$ .
- $\text{C}_3\text{A} = 2.65\text{A} - 1.69\text{F}$ .
- $\text{C}_4\text{AF} = 3.04\text{F}$ .

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases, c'est ainsi que [6] :

- le  $\text{C}_3\text{S}$ , Silicate tricalcique qui libère au cours de l'hydratation une quantité de chaleur voisine du double de celle libérée par le  $\text{C}_2\text{S}$ , donne au ciment une résistance rapide et élevée ; cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.
- Le  $\text{C}_2\text{S}$ , Silicate bicalcique permet au ciment d'atteindre des résistances élevées à moyen et long terme; à fort pourcentage, la chaleur d'hydratation dégagée par le phénomène de prise est plus faible.
- Le  $\text{C}_3\text{A}$ , Aluminate tricalcique est la phase présentant la plus grande vitesse de réaction initiale. C'est la phase dont la réaction d'hydratation est la plus exothermique. De ce fait elle contribue essentiellement à la prise de la pâte de ciment alors qu'elle contribue assez peu à la résistance finale. Elle est par ailleurs facilement attaquée par les sulfates.
- Le  $\text{C}_4\text{AF}$ , Aluminoferrite tétracalcique qui forme une solution solide de C, A et C, F, réagit moins vite que le  $\text{C}_3\text{A}$  : son rôle est mineur dans les réactions de durcissement du ciment.

**Tableau I.2** Principaux minéraux du ciment Portland et leurs caractéristiques [7]

Composition approximative	$3\text{CaOSiO}_2$	$\beta\text{-}2\text{CaOSiO}_2$	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_4\text{Fe}_2\text{O}_3$
Formule abrégée	C <sub>3</sub> S	$\beta$ C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Nom	Alite	Bélite		Phase ferrite
Principales impuretés	MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ...	MgO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ...	SiO <sub>2</sub> , MgO, Alcalis...	SiO <sub>2</sub> , MgO...
Forme cristalline commune	Monoclinique	Monoclinique	Cubique Orthorhombique	Orthorhombique
Proportion des composés présents (%)	35-65	10-40	0-15	5-15
Moyenne dans Le ciment normal	50	25	8	8
Réactivité avec l'eau	Rapide	Lente	Rapide	Moyenne
Contribution à la résistance : Bas âge Long terme	Bonne Bonne	Faible Excellente	Bonne Moyenne	Bonne Moyenne
Chaleur d'hydratation typique (kJ/kg)	Moyenne 120	Basse 60	Elevée 320	Moyenne 100

La présence d'impuretés dans le clinker (MgO, sulfates alcalins, CaO) joue un rôle important sur les propriétés hydrauliques du ciment. Ces composés mineurs proviennent généralement des matières premières, du combustible et parfois des réfractaires ou des équipements.

Les différents types de ciment ainsi que leur composition minéralogique sont représentées dans le **tableau I.3**.

**Tableau I.3 Les différents types de ciment [6]**

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

(\*) Le pourcentage de fillers est limité à 5 %.

### **I.3 Hydratation du ciment portland:**

Lorsque l'on ajoute de l'eau au ciment, on obtient un fluide qui se transforme assez rapidement en une masse durcie. Cette transformation est obtenue grâce à l'hydratation du ciment. Ainsi, l'hydratation est un ensemble de réactions chimiques qui interviennent dès le début de gâchage et qui

se poursuivent dans le temps, pendant plusieurs mois.

Adam Neville [1] a défini l'hydratation comme étant les réactions qui transforment le ciment Portland en un liant et ont lieu dans la pâte en présence d'eau « en présence d'eau, les silicates et les aluminates forment des produits d'hydratation qui donnent avec le temps une masse ferme et dure : la pâte de ciment hydraté. ». Le terme hydratation est employé habituellement pour toutes réactions du ciment avec l'eau en deux manières : dans la première, l'action directe de quelques molécules d'eau provoque une réaction d'hydratation réelle, ou réaction d'hydratation proprement dite; dans la deuxième, la réaction avec l'eau provoque l'hydrolyse.

Le fait de mettre en contact l'eau avec le ciment Portland, il se déclenche une série de processus menant aux produits d'hydratation qui, par plusieurs types du fait de faire adhérer avec les actions réciproques, produisent une matrice ferme dense. Une particularité importante de cette réaction complexe est que les réactants initiaux sont dans une forme poudrée. Les réactions hétérogènes de ces minéraux poudrés avec l'eau impliquent tant la solution que l'interface (plus convenablement *'l'interphase'*), les processus. Comme montré par la large base de connaissance tirée des études d'hydratation de ciment étendues, la formation de produits d'hydratation et le développement des traits microstructurels dépendent des processus de solution, les réactions d'intersoins du visage (les phénomènes topo-chimique) et, finalement, les réactions d'état solide [7].

### I.3.1 Les théories d'hydratation

Selon **Regound M** [8], deux théories sont suggérées par Le Chatelier (1887) et Michaelis (1893) :

- La théorie cristalloïdale de Le Chatelier : (théorie de la dissolution-cristallisation)

D'après **Le Chatelier**, le ciment mis en présence d'eau donne naissance à une solution sursaturée. Les composés anhydres se dissolvent puis les hydrates formés, peu solubles, précipitent sous forme de microcristaux, ce qui permet une nouvelle dissolution des éléments anhydres. Les réactions se poursuivent jusqu'à la mise en solution de la totalité du liant. Le durcissement est alors dû à la multiplication et à l'adhérence des cristaux formés.

- La théorie topo-chimique de Michaelis:

Michaelis a expliqué le phénomène d'hydratation comme suit :

Il se produit d'abord un phénomène de dissolution provoquant un gonflement des grains et l'apparition d'une solution très concentrée en chaux. Cette solution agit sur les silicates pour donner un gel de silice et de chaux qui augmente peu à peu de volume en absorbant continuellement l'eau et

la chaux. Le gel durcit, devient imperméable et l'hydratation se poursuit à l'intérieur des grains de ciment protégés par cette enveloppe.

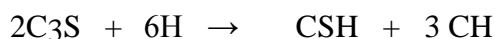
Selon ces deux théories, on déduit que l'hydratation du ciment portland est basée sur les réactions subies par les silicates et la dissolution des aluminates.

Pour bien comprendre les changements chimiques et physiques qui se produisent au cours de l'hydratation du ciment portland, il est essentiel d'étudier séparément les réactions des silicates et des aluminates.

### I.3.2 Hydratation du silicate tricalcique C<sub>3</sub>S

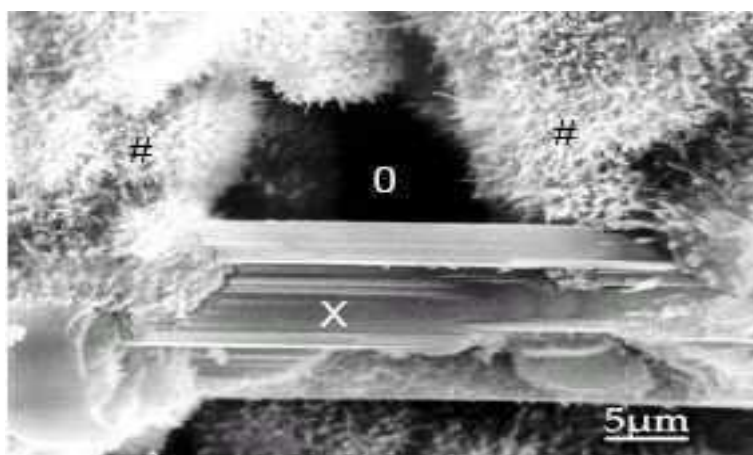
L'hydratation des silicates produit des gels de silicate de calcium hydraté et l'hydroxyde de calcium.

La réaction du C<sub>3</sub>S avec de l'eau est la suivante:



D'où { CSH représente le 3CaO.2SiO<sub>2</sub>. 3H<sub>2</sub>O (Silicate de calcium hydraté)  
Et  
CH représente le Ca(OH)<sub>2</sub> (Portlandite).

Les hydrates ainsi obtenus au cours de l'hydratation du C<sub>3</sub>S (figure I.3) sont:



**Fig I.3** CSH fibreux avec Cristal de Portlandite (X) entre des CSH (#), La porosité est repérée par (O) [9]

- Les silicates de calcium hydratés (CSH) qui occupent entre 60 et 70% du volume de solide d'une pâte de ciment complètement hydratée. Ils ont une structure en feuillets formées de cristaux très petits et mal cristallisés. La surface spécifique est très élevée (100 - 700 m<sup>2</sup>/g). La cohésion des feuillets de CSH est due aux forces de Van Der Waals entre leurs parties colloïdales

- L'autre composant principal dans l'hydratation des silicates tricalciques est l'hydroxyde de calcium CH (ou Portlandite) qui occupe entre 20 à 25% du volume des solides de la pâte de ciment complètement hydratée. La portlandite a une morphologie hexagonale prismatique. Elle participe peu

au développement de la résistance. En fait, la présence de la portlandite peut être un risque, parce qu'elle est fortement soluble et susceptible à l'attaque d'acide et de sulfate [10].

Le processus d'hydratation du  $C_3S$  passe par quatre phases successives [11] :

#### A- Période pré-dormante :

Réaction instantanée et exothermique du  $C_3S$  avec l'eau. En quelques secondes, la solution est sursaturée par rapport aux C-S-H et la teneur en ions silicate atteint son maximum. On assiste à une compétition entre les germinations des C-S-H et du  $Ca(OH)_2$ . Tant que la teneur en ions silicate de la solution dépasse une certaine valeur limite, la germination des C-S-H l'emporte.

#### B- Période dormante

Les réactions précédentes se poursuivent pendant quelques heures à vitesse décroissante par suite du PH élevé et de la forte concentration en calcium. La quantité des C-S-H formés est très faible de même que la consommation en eau. Lorsque la solution est saturée en portlandite, celle-ci précipite et il se produit alors un effet de « pompe à calcium » à la surface des grains qui accélère leur dissolution. Le « gâchage chimique » selon les termes de Christian Vernet, que constitue le début de la précipitation de la portlandite déclenche une nouvelle formation rapide des C-S-H, caractérisée par une diminution des ions  $Ca^{2+}$  et  $OH^-$  ainsi que par l'augmentation du flux thermique. Ces phénomènes marquent la fin de la période dormante.

#### C- Période de prise

Pendant cette période, l'essentiel des propriétés du ciment durci (stabilité de volume, durabilité) se forme. L'atteinte de ces propriétés est due à la formation d'une grande quantité de C-S-H en un réseau rigide. Les fibres de C-S-H et les cristaux de portlandite s'enchevêtrent et remplissent les pores. Le matériau se densifie et devient solide.

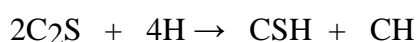
#### D- Période de durcissement

La réaction d'hydratation du  $C_3S$  se poursuit lentement tant qu'il subsiste de l'eau dans les pores capillaires de la pâte durcie. La couche d'hydrates qui enrobe les grains de silicate anhydre atteint une épaisseur suffisante pour ralentir la diffusion des ions et de l'eau. L'hydratation totale du  $C_3S$  peut prendre entre plusieurs mois et plusieurs années.

En créant les C-S-H, l'hydratation du  $C_3S$  est responsable des performances mécaniques des pâtes de ciment aux échéances courtes et moyennes.

### **1.3.3 Hydratation du silicate bicalcique $C_2S$**

Une fois hydraté, le  $C_2S$  donne aussi des CSH. La réaction est donnée par:

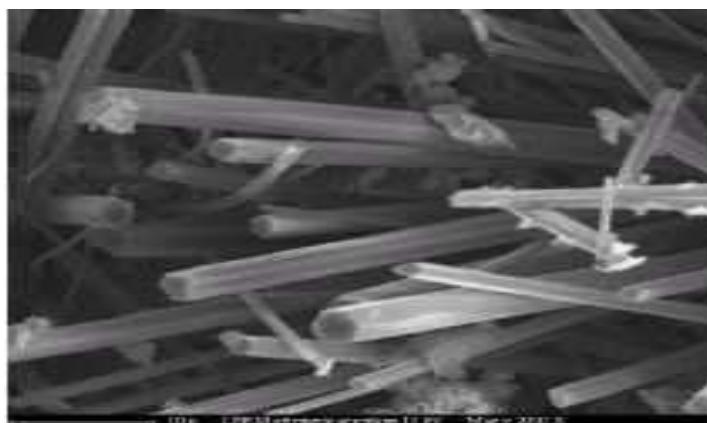


Les études calorimétriques ont montré des résultats semblables à ceux de l'hydratation de C<sub>3</sub>S mais avec moins d'évolution de la chaleur. Selon des calculs de stœchiométrie. L'hydratation de C<sub>3</sub>S produirait 61% de gel de CSH et 39% de CH alors que l'hydratation de C<sub>2</sub>S produirait 82% de gel de CSH et seulement 18% de CH, donc une quantité plus élevée de C<sub>2</sub>S dans le ciment aurait comme conséquence plus de résistance. Pour la résistance au jeune âge, cependant, plus de C<sub>3</sub>S est nécessaire, parce que sa vitesse de réaction est plus élevée.

#### I.3.4 Hydratation de l'aluminate tricalcique C<sub>3</sub>A

L'hydratation des aluminates est considérablement influencée par la présence du gypse (CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O). En l'absence du gypse, la réaction de C<sub>3</sub>A avec de l'eau est très violente et mène au raidissement immédiat de la pâte, connu sous le nom de prise rapide. En présence du gypse, les C<sub>3</sub>A réagissent d'abord pour former le tri-sulfo-aluminate hydraté (Ettringite) qui se cristallise en aiguilles à base Hexagonale (**figure I.4**).

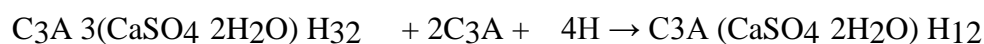
La réaction est donnée par:



**Fig. I.4** *Microscopie Electronique à Balayage, ettringite aciculaire (aiguille) dans un béton [5]*

Le gypse ajouté au clinker (3 à 5% en poids) n'est pas en teneur suffisante pour transformer tous les aluminates en ettringite. Il apparaît donc secondairement un mono-sulfo-aluminate qui se cristallise en plaquettes hexagonales [12].

La réaction est donnée par:



Les aluminates hydratés ainsi obtenus occupent 15 à 20% du volume de la pâte de ciment complètement hydratée [13].

### I.3.5 Hydratation de l'aluminoferrite tetracalcique C<sub>4</sub>AF

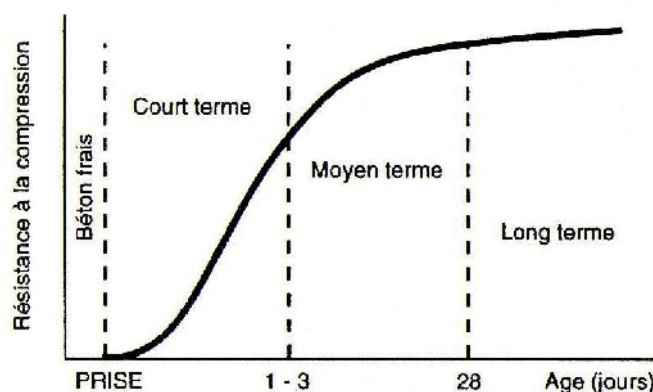
Le C<sub>4</sub>AF réagit avec le gypse avec un mode semblable que celui de C<sub>3</sub>A, mais dans ce cas, la réaction est beaucoup plus lente. Dans la première étape de la réaction, le C<sub>4</sub>AF produit une forme élevée de sulfo-aluminate de calcium qui réagit avec l'excès de C<sub>4</sub>AF pour donner une basse forme de sulfo-aluminate. Ces sulfo-aluminates occupent environ 15-20% du volume de solides dans la pâte. La réaction du C<sub>4</sub>AF dégage peu de chaleur et participe peu au développement de la résistance [10].

## I.4 quelques paramètres influent sur les résistances à jeunes âges de mortiers et bétons.

### I.4.1 Notion de résistance à court terme

La période qui désigne le court terme démarre au début de prise. Elle est caractérisée par une grande activité chimique qui se traduit par une croissance rapide de la résistance du béton.

Cette période est utile pour décider des moments de décoffrage et de mise de précontrainte par exemple **Figure I.5**.



**Figure I.5** *Processus de durcissement du béton [14]*

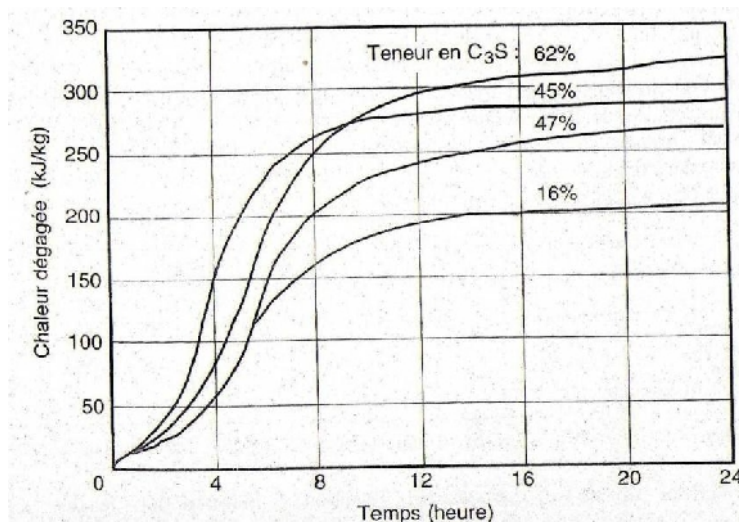
Plusieurs paramètres caractérisant les ciments peuvent influencer les résistances mécaniques des mortiers et bétons à jeunes âges. Ces paramètres peuvent être liés à la nature du ciment (composition minéralogique et microstructural), à la quantité du ciment utilisé dans le mélange, au type de ciment (classe, ajouts, etc...) ou à d'autres paramètres tels que le rapport E/C dans le mélange, la température de murissement du béton, l'utilisation d'accélérateurs de prises ou de durcissement ou encore

l'utilisation des traitements thermiques.

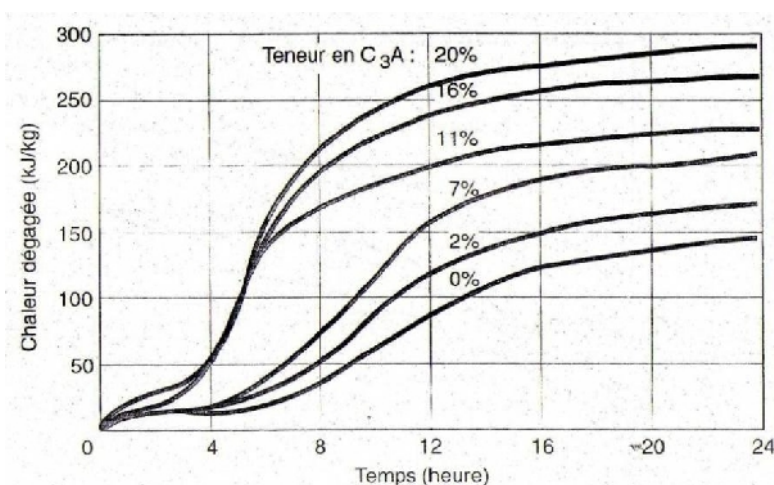
### **I.4.2 Influence de l'hydratation des phases minérales du ciment sur les résistances à courts termes**

Nous avons montré au préalable que le durcissement de la pâte de ciment est exothermique et qu'il est intimement lié au dégagement de chaleur due à l'hydratation des différentes phases minérales du ciment. La connaissance du dégagement de chaleur est une donnée importante dans l'utilisation des ciments appropriés.

L'influence des taux de C3S et du C3A sur la quantité de chaleur dégagée à jeunes âges peut être jugée à partir des figures suivantes [14]



***Fig. I.6 : Influence de la teneur en C3S sur le dégagement de chaleur du ciment aux premières heures d'hydratation [14]***

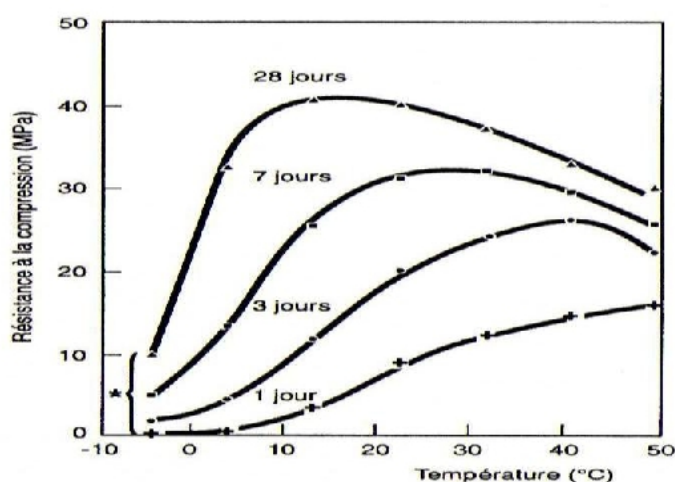


***Fig. I.7: Influence de la teneur en C3A sur le dégagement de chaleur aux premières heures d'hydratation [14]***

Nous remarquons que la teneur en C3S permet d'accentuer le processus d'hydratation du ciment aux premières heures ce qui donnera au mélange cimentaire des résistances à jeunes âges élevées. La chaleur d'hydratation dégagée par le C3A est essentiellement orientée vers l'accélération du processus de prise.

### I.4.3 Influence de la température de murissement du béton sur les résistances à jeunes âges des bétons

Les résistances à courts termes peuvent aussi être influencées par la température de murissement des bétons (figure I.8).

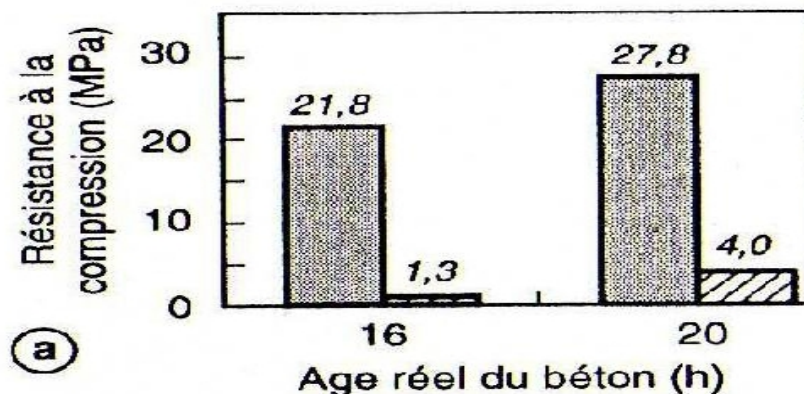


\* Béton fabriqué à 4 °C et conservé immédiatement à - 4 °C.

**Fig. I.8** Influence de la température du murissement sur la résistance à la compression d'un béton [1]

En effet, On peut remarquer que plus la température de fabrication et/ou du murissement du béton est élevée, plus la résistance à court terme est grande (1 jour). Ceci est expliqué par le fait que l'hydratation du ciment est une réaction thermo-activée et que la vitesse à la quelle se fait la réaction chimique croît avec la température.

**La figure 1.9**, illustre l'influence de la température de fabrication sur les résistances à court terme d'un béton dosé à 400 kg/m<sup>3</sup> de ciment CPJ CEM II 42.5 R à 20°C et 12°C, respectivement.

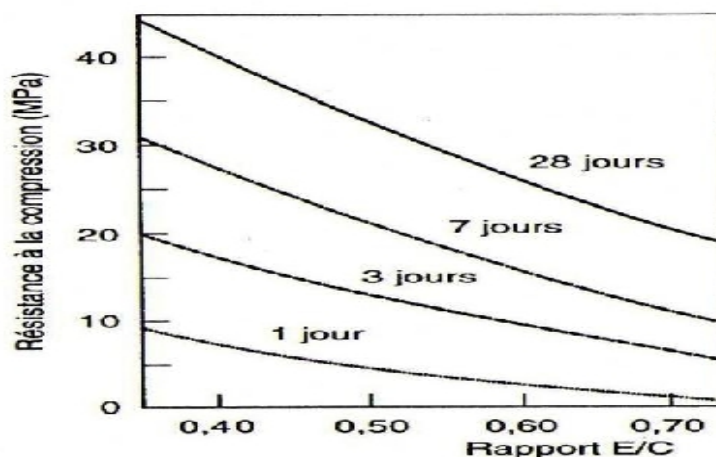


**Fig 1.9** Influence de la température du murissement sur la résistance à la compression d'un béton à 16 et 20 heures [14]

On peut remarquer que pour un écart de température de murissement de moins de 10°C, les résistances obtenues à 16 heures et 20 heures sont très différentes, ce qui montre la grande influence de la température sur les résistances à court terme.

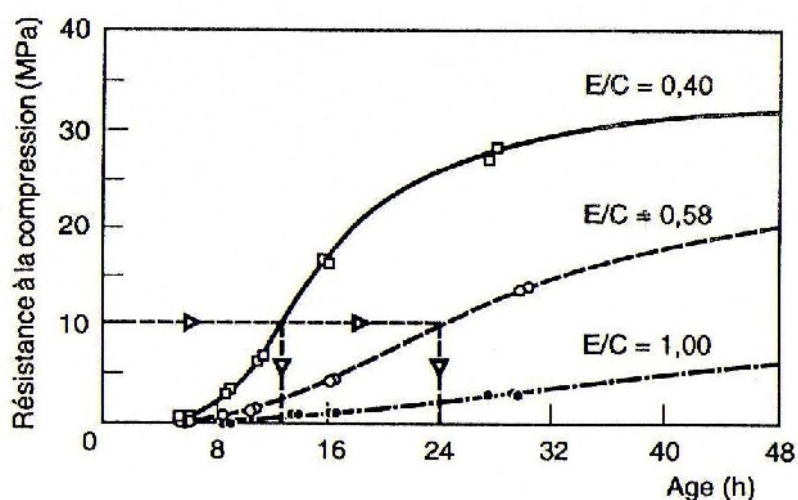
#### **I.4.4 Influence du rapport E/C sur les résistances à jeunes âges des bétons**

La résistance du béton est en relation directe avec la porosité de la pâte de ciment, cette porosité résultant principalement de la valeur du rapport E/C. Ainsi, la résistance à la compression est directement liée au rapport E/C, comme l'indique la figure I.10 [3,15]. L'influence du rapport E/C est pratiquement similaire à toutes les échéances du béton.



**Fig I.10** Influence du rapport E/C sur la résistance du béton, d'après Kosmatka et al [3,15]

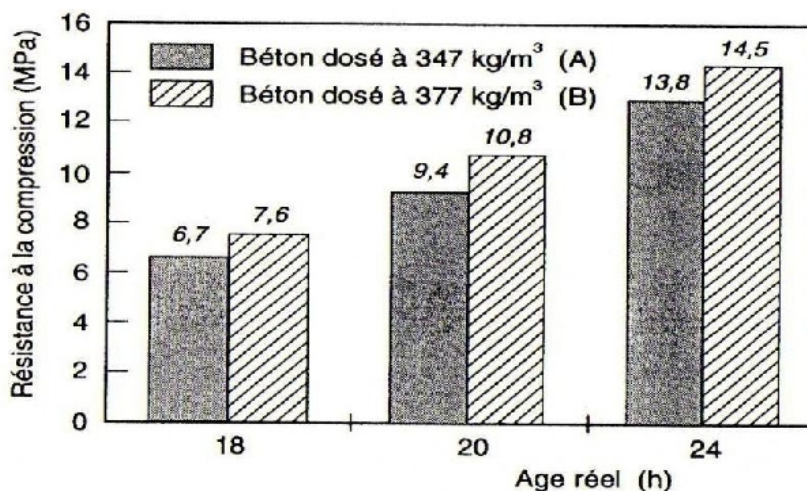
Les résultats obtenus par **Byfors [16]** permettent d'observer l'évolution de la résistance aux premières heures des bétons de rapport E/C variant de 0,40 à 1,00 (**Fig. I.11**). Cela confirme qu'à une échéance donnée, la résistance est d'autant plus élevée que le rapport E/C diminue [3]. Il est donc clair que pour améliorer les résistances à court termes des bétons, une des premières solutions est de réduire la quantité d'eau dans les mélanges cimentaires sans pour autant altérer la maniabilité et la mise en œuvre.



**Fig I.11** Influence du rapport E/C sur l'évolution de la résistance à la compression au jeune âge du béton, d'après Byfors [3,16]

#### I.4.5 Influence du dosage en ciment sur les résistances à jeunes âges des bétons

La figure I.12, illustre l'influence du dosage en ciment sur les résistances à courts termes de bétons à même ouvrabilité, dosés à 347 et 377 kg/m<sup>3</sup> de ciment CPJ CEM II 42.5 R. Les rapports E/C sont de 0,54 et 0,51 respectivement.



**Fig I.12** Influence du dosage en ciment sur les résistances en compression à courts termes des bétons [14]

On peut remarquer que l'augmentation de la résistance à 18 et 20 heures est de 15%. Cette augmentation de résistance peut être expliquée par:

- La réduction du rapport E/C,
- L'exothermie plus élevée qui est due au surdosage en ciment.

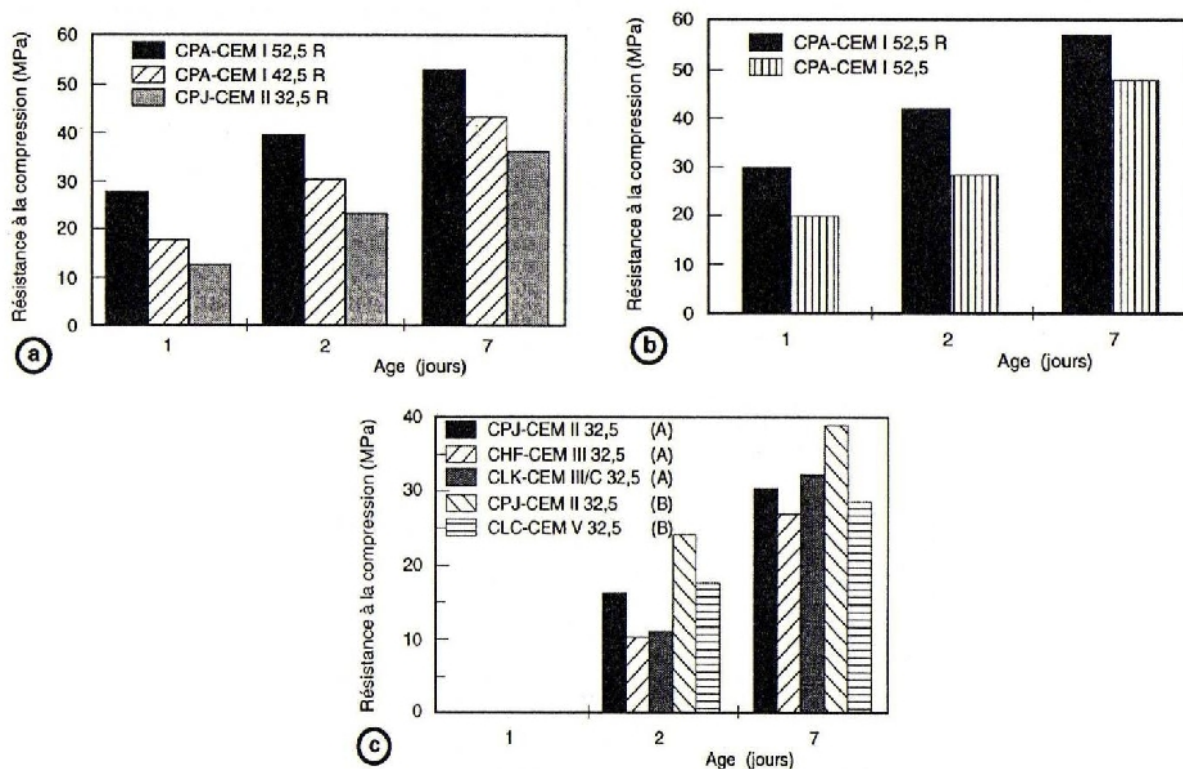
#### I.4.6 Influence du type et de la classe du ciment sur les résistances à jeunes âges des bétons

Les figures I.13 (a, b et c), illustrent l'influence:

- ✓ De la classe du ciment (32.5, 42.5 et 52.5),
- ✓ De son type de durcissement (ordinaire ou rapide R)
- ✓ Et du type de ciment (CEM I, CEM II et CEM III).

On peut remarquer que:

- La figure I.13-a illustre l'influence de la classe du ciment. Plus la classe de résistance est élevée, plus les résistances à courts termes sont élevées.
- La figure I.13-b illustre l'influence de la classe de durcissement à court terme. Pour une classe donnée, un ciment R, développe à courts termes des résistances plus élevées.
- La figure I.13-c illustre l'influence de la composition du ciment. Pour une même classe, les ciments de compositions différentes développent des résistances à courts termes différentes.



**Fig I.13** Influence de la nature du ciment sur les résistances en compression à courts termes d'un béton [14]

En effet, un béton dosé identiquement avec des ciments de nature et de classe différentes, du CPJ-CEM II 42,5 R ou du CPA-CEM I 52,5 R présente des caractéristiques thermiques et mécaniques différentes (figure I.14). Le béton de CPA-CEM I 52,5 R commence à réagir plus tôt, ce qui se traduit par des gains de résistance rapide [3].

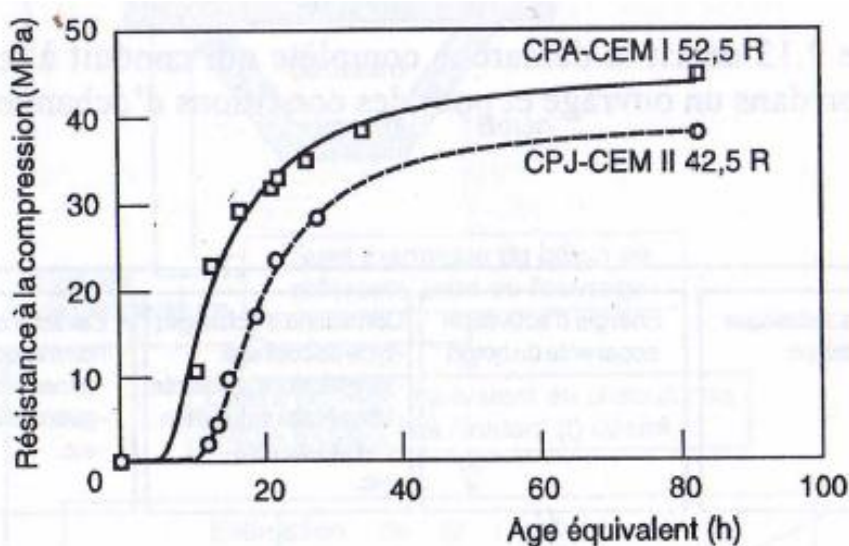


Fig I.14 Résistances mécaniques de deux bétons ne différant que par le type de ciment utilisé [3]

#### I.4.7 Influence de l'utilisation des accélérateurs de prise et de durcissement sur les résistances à jeunes âges des bétons

Les accélérateurs de prise et de durcissement sont souvent utilisés dans les bétons pour compenser en temps froids, l'influence de la température sur les résistances à courts termes. Ils constituent également un moyen efficace d'obtenir les résistances à très courts termes nécessaires pour optimiser les cycles de production sur les chantiers. L'influence des accélérateurs de prise et de durcissement peut être illustrée sur la figure I.15.

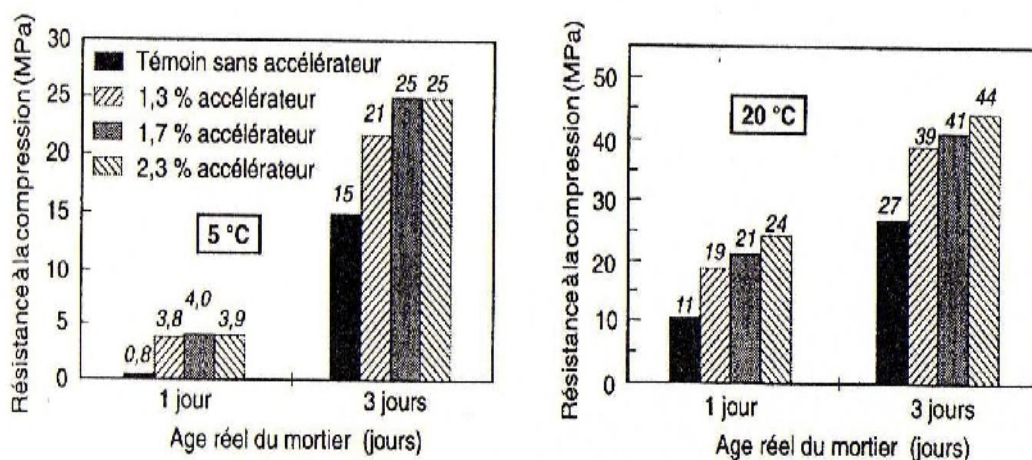
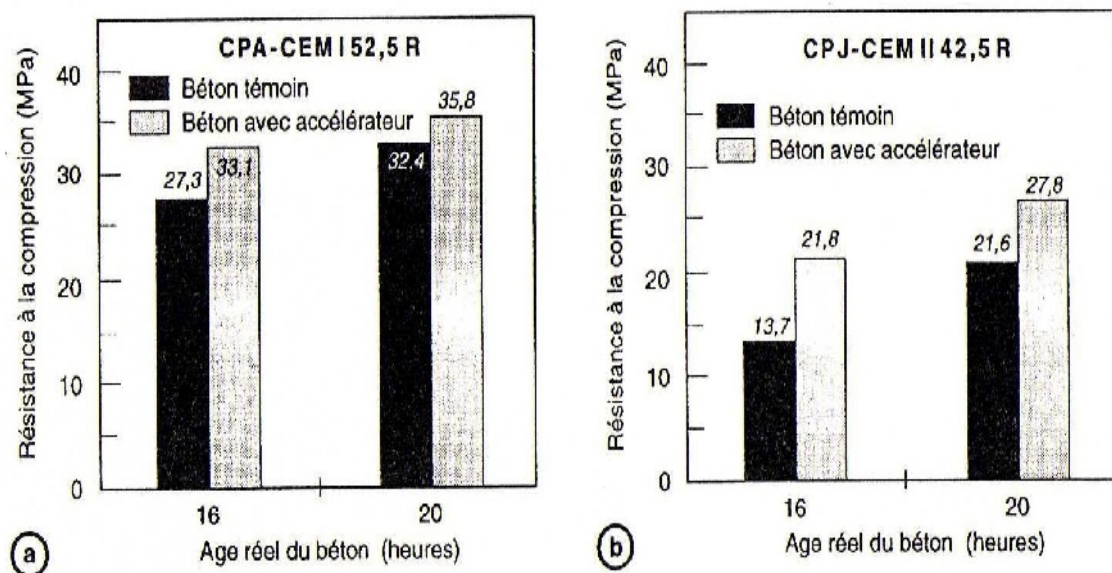


Fig I.15 Influence d'un accélérateur de prise sur les résistances en compression à courts termes d'un mortier [14]

On peut remarquer qu'une augmentation importante de la résistance à 1 jour qui passe de 0.8 à 3.8 Mpa, avec 1.3 % d'accélérateur de prise, pour une température de 5°C. L'apport de l'accélérateur est inférieur à celui de la température dont l'apport sur les résistances à court terme à 20°C est supérieur à celui de l'accélérateur.

La **figure I.16** illustre l'effet d'un accélérateur de prise sur des bétons avec différents ciments.

On peut remarquer que l'effet de l'accélérateur de prise est plus efficace avec un béton fabriqué à base de CPJ-CEM II 42.5 R qu'avec un CPA-CEM I 52.5 R. Cependant cette analyse ne peut être généralisée en raison de la vitesse de maturité des deux ciments. En effet, le ciment CPJ-CEM II 42.5 R est toujours dans sa période de durcissement rapide, alors que le ciment CPA-CEM I 42.5 R en est sorti et connaît un accroissement de résistances beaucoup plus modérées.



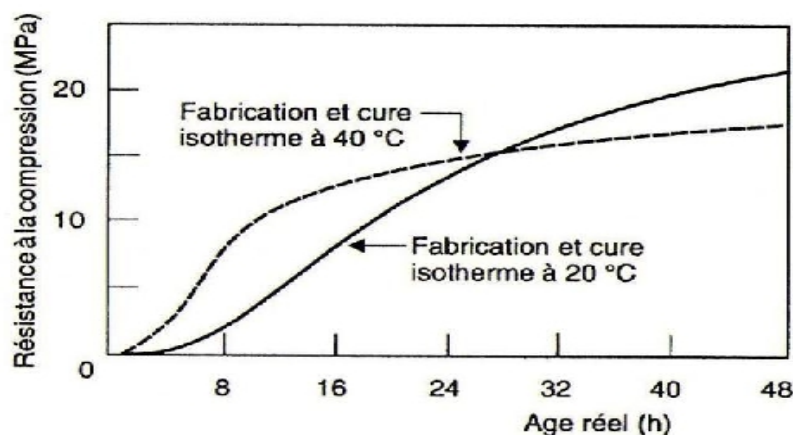
**Fig I.16** Résistance en compression à courts termes de bétons avec et sans accélérateur de prise [14]

#### **I.4.8 Influence du traitement thermique sur les résistances à jeunes âges des bétons**

Le traitement thermique est une technique qui consiste à accélérer la réaction d'hydratation du béton par le biais d'une augmentation de sa température initiale ou de sa température de conservation. Ceci permet d'obtenir des résistances à courts termes suffisantes pour procéder au décoffrage ou à la mise en prétention.

Il existe plusieurs modes de traitements thermiques, tels que le calorifugeage du moule, le chauffage du béton avant sa mise en place et le chauffage du béton après sa mise en place (étuvage).

La figure I.17 montre l'influence de la température de fabrication et de murissement sur l'évolution de la résistance à court terme d'un béton dosé à 400 kg/m<sup>3</sup> de CPA-CEM I et un rapport E/C=0.45.



***Fig I.17 Influence de la température de cure et de préchauffage sur le développement des résistances en compression à courts termes des bétons [14]***

On peut remarquer que l'augmentation de la température accélère les gains de résistance à court terme. En revanche, à plus long terme, les résistances sont plus faibles pour les bétons fabriqués et conservés à une température plus élevée. Ceci montre que pour des températures extrêmes, la température provoque au sein du béton des désordres qui affectent ses résistances, qui peuvent être d'origine physique ou chimique. Les principales causes physiques sont l'augmentation de la porosité et de la microfissuration de la pâte de ciment hydraté. Les principales causes chimiques sont les modifications de la nature des hydrates et du degré d'hydratation de la pâte de ciment durcie.

### I.5 Synthèse :

La revue bibliographique sur le ciment Portland a permis de montrer que les résistances à courts termes des matériaux cimentaires (mortiers et bétons) étaient beaucoup influencées par la nature du ciment (composition minéralogique), le type du ciment, la classe du ciment et le dosage en ciment. Le premier constat est de relever que la teneur en C3S et C3A influait beaucoup le processus d'hydratation du ciment. En effet l'hydratation du silicate tricalcique étaient accompagnée dès les premières heures d'un fort dégagement de chaleur qui permettait d'accélérer le processus de durcissement et donner à la pâte de ciment ses premières résistances. L'hydratation de l'aluminate tricalcique permettait surtout l'accélération de la prise avec une éventuelle amélioration de la vitesse de durcissement aux toutes premières heures.

Nous avons aussi relevé que l'utilisation de ciments à forts taux de clinker (CPA CEM I), de classe supérieure (52.5) à caractéristique R (durcissement rapide), permettait d'atteindre des résistances à courts termes élevées. Néanmoins ces propriétés génèrent des surcouts importants pour ces types de ciments par une consommation importante d'énergie (fortes quantités de clinker) et forts dégagements de CO<sub>2</sub> ou d'importantes phases de broyage pour atteindre les classes supérieures et la caractéristique R.

D'autres méthodes peuvent être utilisées pour donner aux bétons des résistances à courts termes élevées, il s'agit des accélérateurs de prise et de durcissement ou bien les traitements thermiques. Ces méthodes sont étudiées par d'autres membres de l'équipe de recherche et génèrent aussi des surcouts à la fabrication du béton.

Nous avons proposé d'utiliser des fines calcaires pour étudier leurs effets sur les résistances à courts termes afin de proposer une alternative en employant des additions minérales locales de faibles couts (ENG Khroub).

L'étude de l'effet des additions minérales en général et des fines calcaires en particulier sera développée dans le chapitre II.

## CHAP II Effets des additions minérales sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des matrices cimentaires

### II.1 Introduction :

L'amélioration de certaines propriétés des matériaux cimentaires fait appel à des matériaux de nature minéralogique appelés « les additions minérales ». En substitution en masse de ciment, les additions minérales sont incorporés directement dans les mélanges cimentaires ; pate, mortier et béton. Cette substitution peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et parfois du point de vue mécanique et de durabilité.

Une addition minérale est définie par la norme européenne EN 206-1 comme étant :  
« Un Matériau minéral finement divisé utilisé dans le béton afin d'améliorer certaines propriétés ou pour lui conférer des propriétés particulières. »

Parmi les additions minérales utilisées dans les matrices cimentaires, on peut citer :

- Les cendres volantes.
- Les laitiers de haut fourneau.
- Les fillers calcaires.
- Les fumées de silice.

La norme européenne EN 206-1 considère deux types d'additions :

Additions de type I : Additions quasiment inertes, elles n'ont aucune action chimique sur les matrices cimentaires.

L'aptitude générale à l'emploi comme additions du type I est établie pour :

- Les fillers conformes à la prénorme prEN 12620 :2000 ;
- Les pigments conformes à la norme EN 12878.

Additions de type II : Ceux sont les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique latent, elles présentent, même partiellement, des propriétés hydrauliques ou pouzzolanique en présence de ciment et d'eau.

L'aptitude générale à l'emploi comme additions du type II est établie pour :

- Les cendres volantes conformes à la norme EN 450 ;
- Les fumées de silice conformes à la prénorme prEN 13263 :1998.

L'aptitude générale à l'emploi pour des bétons utilisés en France est établie pour les additions normalisées suivantes :

- Les cendres volantes pour béton conformes à la norme NF EN 450-1 ;
- Les fumées de silice conformes à la norme NF P 18-502 ;
- Les laitiers vitrifiés moulus de hauts fourneaux de classe B conformes à la norme NF P 18-506
- Les additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508 ;
- Les additions siliceuses de catégorie A, conformes à la norme NF P 18-509.

➤ Additions calcaires conformes à la norme NF P 18-508

Les additions calcaires sont des produits secs finement divisés, obtenus par broyage et/ou sélection, provenant de gisements de roches calcaires pouvant être dolomitiques, massives ou meubles. Deux de ces caractéristiques sont particulièrement significatives pour compléter cette définition :

- ✓ Une teneur minimale en carbonates totaux (calcaire + dolomie), ainsi qu'une teneur minimale en carbonate de calcium.
- ✓ Une valeur minimale de l'indice d'activité.

Les additions calcaires conformes à la norme NF P18-508 sont du type I selon la norme EN 206-1 et sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de cette norme.

➤ Les additions siliceuses conformes à la norme NF P 18-509

Les additions siliceuses sont des produits finement divisés, constitués à plus de 96 % (valeur spécifiée inférieure) et à plus de 93.5 % (valeur limite absolue inférieure), par de la silice exprimé en  $\text{SiO}_2$  mesurée sur produit sec et obtenus par broyage et/ou sélection de quartzes ou de cristobalites synthétiques.

Les additions siliceuses conformes à la norme NF P18-509 sont du type I selon la norme EN 206-1 et sont substituables au ciment au sens et sous les conditions de cette norme.

➤ Les fumées de silice conforme à la norme NF P 18-502

La fumée de silice est une poudre amorphe finement divisée résultant de la production d'alliages de silicium ou contenant du silicium. Elle est entraînée depuis la zone de combustion des fours par les gaz, vers le système de captage.

La norme distingue deux classes A et B ; les fumées de silice de classe A étant les plus riches en silice et sont plus fines. Une fumée de silice de classe A ou B, conforme à la norme est une addition du type II au sens de la norme EN 206-1 et est substituable au ciment au sens et aux conditions de cette norme.

Toute fois, compte tenu de la très grande finesse de ces additions et de leur très grande réactivité avec

la portlandite libérée par l'hydratation du ciment, leur proportion est limitée à 10 % et leur emploi réservé aux bétons contenant un superplastifiant.

➤ Les cendres volantes pour béton conformes à la norme NF EN 450-1

Les cendres volantes sont une poudre fine constituée principalement de particules vitreuses de forme sphérique, issues de la combustion du charbon pulvérisé en présence ou non de co-combustibles, ayant des propriétés pouzzolanique et composées essentiellement de  $\text{SiO}_2$  et de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ; la proportion de  $\text{SiO}_2$  réactive constituant au moins 25 % de la masse. Les cendres volantes conformes à la norme NF EN 450-1 sont des additions de type II au sens de la norme EN 206-1, et sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

➤ Laitiers vitrifié moulu de haut fourneau conformes à la norme NF P 18-506

Le laitier vitrifié moulu provient du broyage du laitier vitrifié granulé ou bouleté, coproduit de la fabrication de la fonte et obtenu par trempe du laitier de haut fourneau en fusion.

Sont exclues de la norme : les laitiers de fonte non trempés cristallisés et donc non vitrifié utilisés comme ballast ou comme granulats et également les laitiers d'aciéries et tous les laitiers de métaux non ferreux qui peuvent contenir des éléments nuisibles au béton tels que les sels métalliques.

La norme distingue deux classes de laitier A et B ; la dernière est la plus réactive, sa finesse étant plus élevée. Les laitiers conformes à la norme NF P 18-506 sont des additions de type II au sens de la norme EN 206-1, mais seuls les laitiers de classe B sont substituables au ciment au sens et selon les conditions de cette norme.

## **II.2 Effets des additions minérales sur les matrices cimentaires :**

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. Les mécanismes à l'origine de ces modifications sont particulièrement complexes cependant plusieurs études récentes dans ce domaine [3,17, 18] s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaires :

- *Un effet granulaire* résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.

- *Un effet physico-chimique et microstructural* engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de

l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.

- *Un effet purement chimique* propre à certaines additions en milieu cimentaire (essentiellement présent dans le cas des additions du type II selon la norme EN 206-1), qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural.

Une superposition, peut être résultat de l'intervention des différents effets simultanément, influençant les propriétés à l'état frais et durci du matériau cimentaire. Ce qui complique l'évaluation de la contribution des additions minérales aux performances des matériaux cimentaires.

✓ L'effet granulaire ou effet filler :

L'effet «granulaire », appelé aussi effet « filler », est par définition l'incorporation d'addition minérale dans un matériau cimentaire pour modifier le squelette granulaire du mélange. Ces modifications peuvent résulter de la capacité d'empilement des particules fines ou ultrafines de l'addition avec les autres grains solides du mélange et/ou de l'intensité des frictions entre les différentes particules du mélange. En tenant compte des facteurs tels que la morphologie, la surface texturale, la distribution granulaire et le potentiel zéta des particules d'addition utilisées ; qui influent sur la rhéologie des matériaux cimentaires, l'effet granulaire peut être favorable ou défavorable [19, 18].

Selon **Gallias** [20], l'effet granulaire concerne l'empilement des particules solides de l'addition avec les autres particules solides du squelette granulaire du béton (ciment, sable).

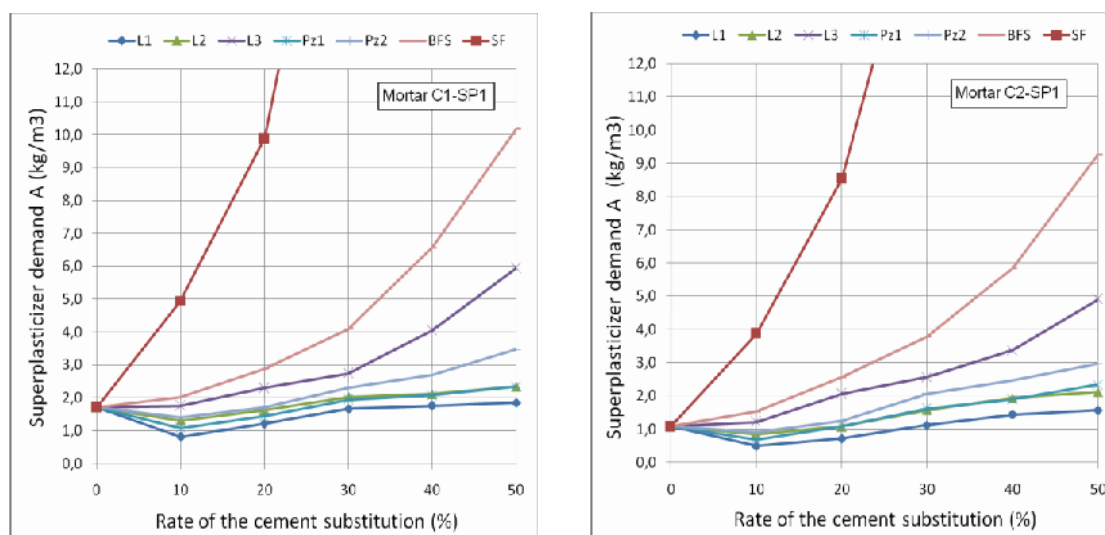
Selon **Baron** et **Ollivier** [3], On explique, par fois, à tort d'activité d'une addition calcaire est par ce que l'on appel « effet filler » ; intuitivement, on imagine que les grains fins de la poudre se glissent entre les grains plus gros (ceux du sable), qu'ils augmentent ainsi la compacité et, par conséquent, la résistance ». Une caractéristique importante du béton frais est sa porosité, si l'on fait varier le dosage en éléments fins du béton (tous les grains inférieurs à 63 micromètres, qu'ils appartiennent au ciment, à l'addition ou aux granulats), on observe l'existence d'un dosage optimal pour lequel la porosité du béton frais est minimale. Pour un béton dont la dimension maximale du plus gros granulat est de 20 mm, ce dosage optimal en éléments fins est de l'ordre de 350 kg/m<sup>3</sup>. considérons un béton dont le dosage en ciment est de 250 kg/m<sup>3</sup> et manquant d'éléments fins ; si on lui en ajoute sous forme, par exemple, d'une addition, la quantité d'eau nécessaire pour avoir une consistance donnée diminue et, de même, la porosité du béton frais. Si, on outre, le dosage en ciment est maintenu constant, il s'en suit une augmentation de résistance résultant directement de la diminution du rapport E/C.

L'effet granulaire est dit favorable lorsque les particules de l'addition modifient peu les frictions intergranulaires et parviennent à remplir les porosités du squelette granulaire (ciment et granulats) en libérant l'eau contenue dans ces pores, cet effet conduit soit à l'amélioration de la consistance du mélange frais à quantité d'eau constante soit à la réduction de la quantité d'eau pour une consistance donnée en améliorant la compacité du mélange et les performances mécaniques du matériau durci.

Un effet granulaire est dit positif lorsque les particules de l'addition viennent remplir l'espace laissé vide par les autres particules [20].

Certain chercheurs ont montré que la forme sphérique des particules des cendres volantes est un des paramètres qui améliore la rhéologie des matériaux cimentaires, pour une fluidité donnée, on augmentant la fluidité du mélange avec une quantité d'eau réduite. La forme sphérique réduit aussi le rapport de la surface par le volume des particules, ce qui engendre une demande en eau dans le mélange, plus réduite [19].

**Boudchicha A et al [21]** ont montrés, on étudiant la variation de la demande en superplastifiant SP1 pour des mortiers confectionnés a base de deux ciment C1 et C2 substitués partiellement par des additions calcaires L1, L2 et L3 et pouzzolanes PZ1 et PZ2 fumé de silice SF et laitier granulé de hauts fourneaux BFS , que les Mortiers C1-SP1 et C2-SP1 avec additions calcaires et pouzzolanes (L1, L2, Pz1 et Pz2) de finesse inférieure à 5500 cm<sup>2</sup>/g ont une demande en superplastifiant plus faibles que les mortiers de référence pour les taux de substitution de ciment inférieurs à 20 %. Les mortiers avec aditions (L3) de finesse 8500 cm<sup>2</sup>/g et (BFS) de finesse de 2900 cm<sup>2</sup>/g ont une demande en superplastifiant qui augmente avec le taux de la substitution de ciment. Les mortiers, avec fumée de silice (ultrafine), présentent une demande en superplastifiant la plus importante en accord avec la finesse de l'addition et elle est d'autant plus importante que la quantité de particules ultrafines dans le mélange est importante (figure II.1).

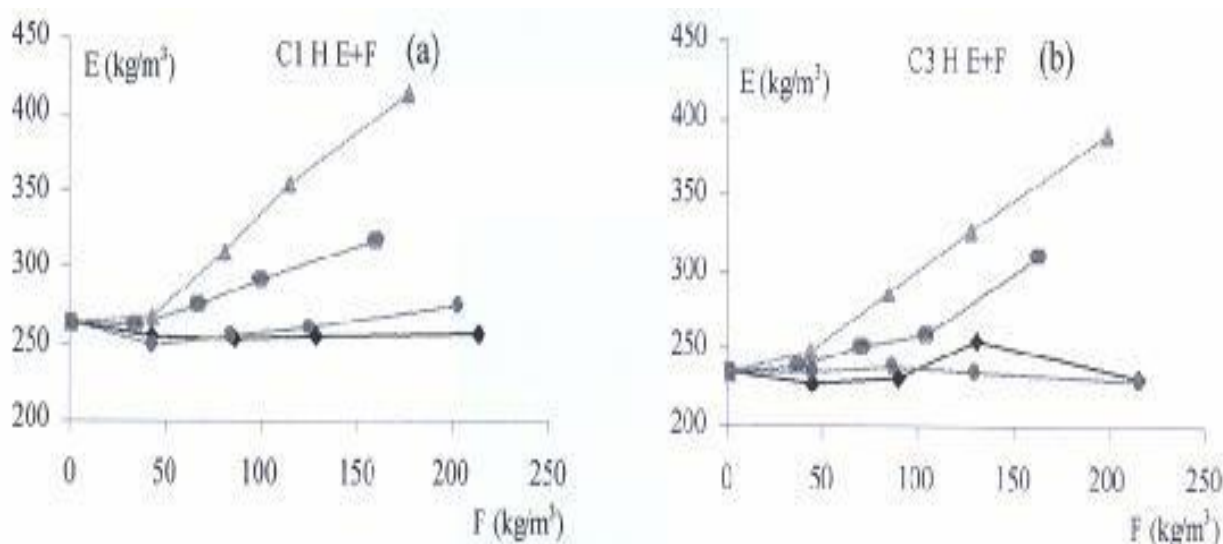


**Figure II.1** Variation de la demande en superplastifiant pour les mortiers C1-SP1 et C2-SP1 avec des mélanges à même consistance en fonction du taux substitution de ciment **Boudchicha et Al [21]**

**Zhang et Han [22]**, ont montré que la contrainte d'écoulement augmentait avec la quantité d'addition ultrafine incorporée, mais la viscosité de la pâte variait avec la nature et la quantité d'addition. Lorsque le taux de substitution du ciment par des additions de fumée de silice, cendres volantes ou calcaires est inférieur à 15 %, la viscosité de la pâte est réduite remarquablement.

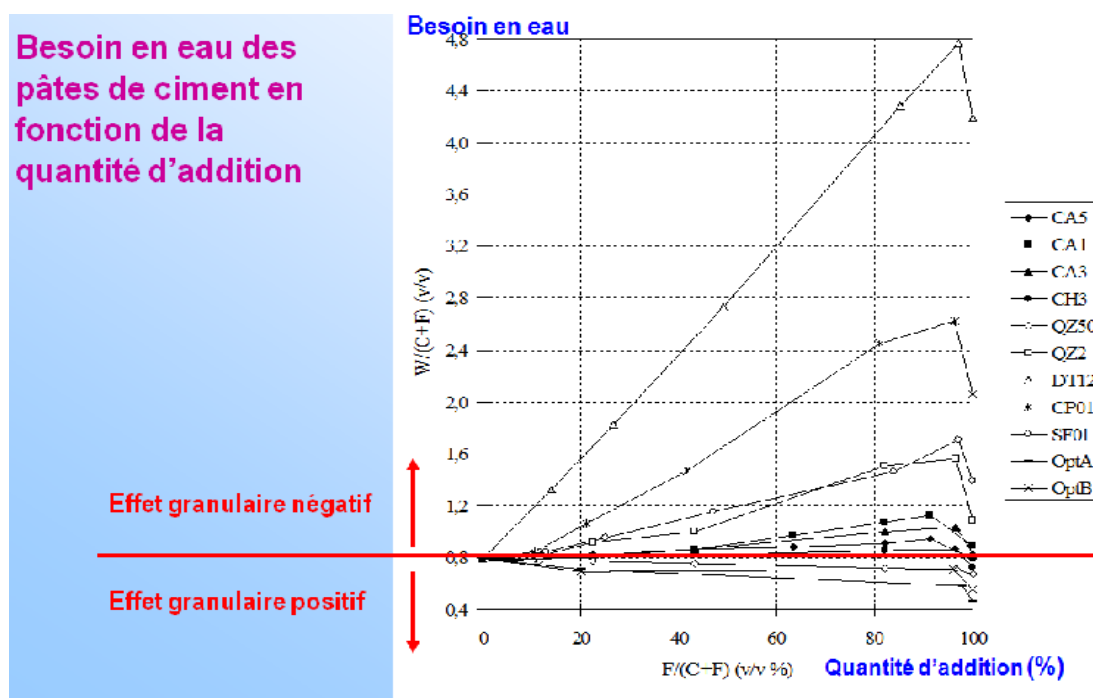
D'autres résultats contradictoires ont montré que l'effet granulaire devient défavorable lorsque les particules de l'addition modifient considérablement les frictions intergranulaires dans les mélanges cimentaires ou ne parviennent pas à remplir les porosités du squelette granulaire. Un effet granulaire négatif lorsque les particules de l'addition viennent écarter les autres particules [20].

**Bessa [23]** a montré en étudiant la contribution des additions minérales aux propriétés physiques, mécaniques et de durabilité des mortiers, que l'effet granulaire des additions minérales sur les formulations des mortiers non adjuvantés dépend en premier lieu de la finesse et de la quantité de l'addition introduite (figure II.2)



**Figure II.2** *Besoin en eau des mortiers CEM II – additions non adjuvantes en fonction du dosage en additions minérales, selon Bessa [23]*

Gallias [20] a montré en étudiant l'effet des additions minérales fines sur le besoin en eau des pâtes de ciment, que l'introduction d'additions à forte proportion dans les pâtes de ciment à consistance normalisée engendre un besoin en eau plus élevé (Fig. II.3).



**Figure II.3** *Besoin en eau des pâtes de ciment en fonction de la quantité d'addition selon Gallias [20]*

Malgré une multitude de résultats expérimentaux disponibles relatifs à l'effet granulaires des additions dans les mélanges cimentaires, nous ne disposons pas actuellement d'une approche suffisamment construite et approfondie, capable de prévoir si une addition donnée peut ou non

produire un effet granulaire favorable dans une formulation. A fortiori nous ignorons sur quel critère nous devons appuyer le choix des additions, notamment les additions calcaires et siliceuses capables d'améliorer les propriétés mécaniques en optimisant le mélange granulaire.

Il en résulte donc que quand les particules des additions minérales modifient peu les frictions entre les grains et remplissent les porosités de la structure granulaire (ciment et agrégats) en libérant l'eau contenue dans ces pores, l'effet granulaire devient favorable et mène à l'amélioration de la fluidité du mélange frais pour une quantité d'eau constante, ou à la réduction de la quantité d'eau pour un consistance donné et à l'amélioration de la compacité du mélange et des résistances mécaniques. Mais, quand les particules des additions minérales modifient fortement les frictions entre les grains dans les mélanges cimentaires ou ne remplissent pas les porosités de la structure granulaire, l'effet granulaire devient défavorable.

✓ Un effet physico-chimique et microstructural

L'effet physico-chimique et microstructural concerne les modifications entre les particules d'additions minérales et le processus d'hydratation du ciment et sur la structuration des produits hydratés, cet effet est appelé aussi «effet physique de surface» [17].

D'après **Baron** et **Ollivier** [3], l'addition calcaires n'as aucune réaction chimique, l'accélération d'hydratation est due à un effet physique expliqué par la germination du silicate de calcium hydraté C-S-H que se produit plus facilement en présence des fines calcaires cette germination plus facile entraine une précipitation plus rapide des C-S-H et donc, aussi, une précipitation plus rapide de la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Les réactions entre le ciment et l'eau sont plus rapide en présence de poudre calcaire et donc, à chaque instant, il y a d'avantage d'hydrates formés .Toutefois, le surplus d'hydrates, par rapport au témoin sans addition, diminue au fur et a mesure que l'hydratation est plus avancée et devient nul quand l'hydratation est complète. Il faut donc distinguer entre l'avancement des réactions d'hydratation du ciment (phénomène d'ordre chimique) et le développement des résistance (phénomène d'ordre physique) qui dépend de la quantité d'hydrates formés par l'hydratation mais aussi de la façon dont ces hydrates s'assemblent, de leur arrangement dans l'espace et de leurs liaisons. Il se produit comme hypothèse, deux conséquences résultant de la germination due au contact de la surface des additions : la première est l'accélération d'hydratation, la deuxième est la modification de l'assemblage des hydrates favorable à la résistance.

Pour les additions siliceuses, les particules de quartz peuvent constituer des sites préférentiels de nucléation en particulier pour la cristallisation des cristaux de portlandite [24].

**Lawrence et al [17]** ont montré en étudiant l'effet des additions minérales inertes sur l'hydratation des mortiers, que le degré d'hydratation à courts termes des mortiers contenant des additions chimiquement inertes était toujours plus important que celui des mortiers de référence sans additions, et ont ainsi confirmé l'amélioration de l'hydratation du ciment avec des additions minérales inertes.

Plusieurs hypothèses ont été émises pour expliquer l'action des additions sur le processus d'hydratation du ciment. Certains auteurs ont montré que la présence des additions minérales dans un mélange cimentaire entraîne une augmentation du rapport effectif E/C et conduit à l'accélération du processus d'hydratation ou encore qu'elle permettait une meilleure dispersion des grains de ciment en conduisant à une structuration de la matrice cimentaire plus efficace [25]. D'autres auteurs considèrent que la présence des additions minérales multiplie les possibilités de germination des produits hydratés du ciment et facilite ainsi la formation d'une structure solide garantissant les premières résistances mécaniques [26,27].

**Caré [28]** a montré que la présence des additions minérales provoque une accélération des réactions d'hydratation du ciment et favorise les propriétés du matériau durci aux jeunes âges, d'autant plus que les particules sont fines, cependant cet effet favorable semble s'estomper avec le temps.

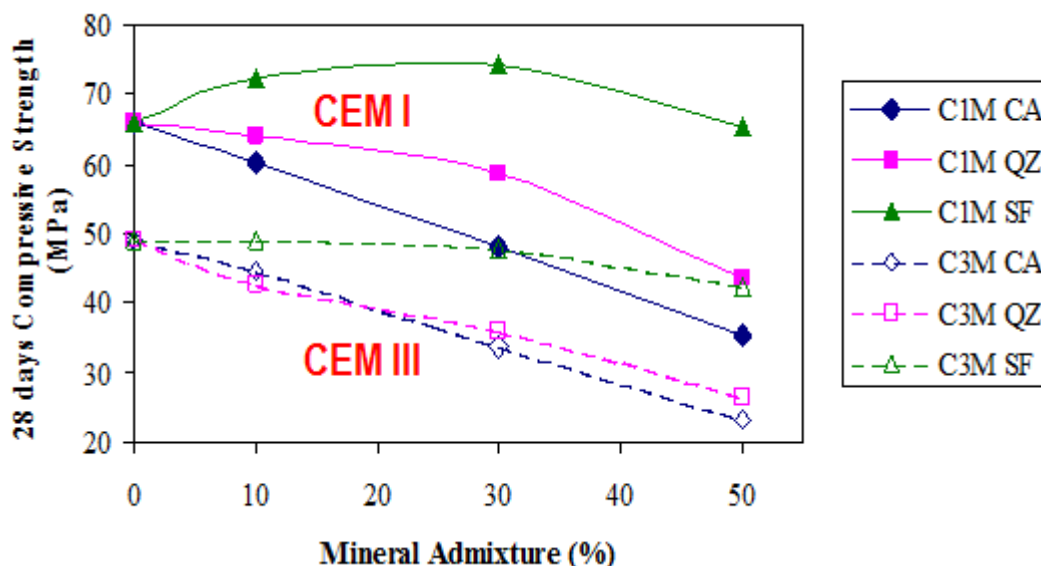
D'une façon générale, l'effet physico-chimique et microstructural des additions minérales agit essentiellement sur l'évolution des résistances mécaniques aux jeunes âges ainsi que sur les propriétés physiques et microstructurales des matériaux cimentaires durcis.

✓ L'effet chimique :

Alors que l'effet physico-chimique et microstructural concerne d'une façon générale toutes les additions minérales indépendamment de leur nature minéralogique, l'effet chimique est intimement lié à leur composition minéralogique et concerne la capacité des additions caractérisées par des propriétés pouzzolaniques et/ou hydrauliques, à réagir avec l'eau et les constituants anhydres ou hydratés du ciment pour former de nouvelles phases minérales qui peuvent contribuer à l'évolution des résistances mécaniques au même titre que les produits hydratés du ciment. Cet effet bénéfique est fonction de nombreux paramètres et peut se manifester à différents âges en fonction de la composition chimique ou minéralogique de l'addition, de sa surface spécifique et du type de ciment.

La normalisation européenne actuelle définit les additions chimiquement actives comme étant de type II en prenant en compte soit leur réactivité hydraulique latente (c'est le cas du laitier de haut fourneau), soit leur activité pouzzolanique (c'est le cas de la fumée de silice et des cendres volantes, parmi les additions disposant d'une normalisation spécifique). Cette activité chimique se traduit en premier lieu par un gain de résistance mécanique.

Selon Gallias [20], l'effet chimique concerne la réactivité chimique de certaines additions minérales actives au contact du ciment (réaction pouzzolanique ou/et réaction hydraulique). Certains composants des additions (silice réactive, alumine réactive) réagissent avec les produits hydratés du ciment et forment de nouveaux produits qui contribuent à la cohésion du béton et à sa résistance aux agressions (Figure II.4).

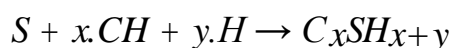


**Figure II.4** Influence du type de ciment et de la quantité d'addition sur la résistance en compression des bétons, Gallias [20]

Selon Baron et Ollivier [3], les additions calcaires présentent aussi une réactivité en présence des produits hydratés du ciment et forment des carboaluminates de calcium hydratés.

A longue échéance, les chercheurs ont confirmé, en comparant l'évolution des résistances mécaniques des mortiers confectionnés avec deux cendres volantes et une addition calcaire, que l'activité chimique des additions calcaires est toutefois significativement plus faible que celle des additions siliceuses à caractère pouzzolanique.

La réaction pouzzolanique concerne principalement les fumées de silice, les cendres volantes siliceuses (Classe F), les pouzzolanes naturelles ou les schistes calcinés. La silice amorphe présente dans ces différentes additions réagit, en présence d'eau, avec le « portlandite » qui est produite par l'hydratation du ciment pour former les silicates de calcium hydratés C-H-S suivant la réaction chimique :



Il faut noter que les particules les plus fines du quartz (considéré a priori comme inerte en milieu cimentaire) dont le diamètre est inférieur à  $5\mu\text{m}$  peuvent également présenter une activité pouzzolanique similaire [24].

L'activité hydraulique concerne plus particulièrement les laitiers de haut fourneau et les cendres volantes (classe C) qui, en raison du caractère basique du milieu cimentaire, peuvent produire des C-S-H dont le rapport C/S diffère de celui des C-S-H issus de la réaction pouzzolanique. Pour les additions calcaires, la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) réagit avec les aluminates du ciment ( $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ) en présence d'eau pour former un monocarbonate de calcium hydraté du type ( $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Ca OH}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ ), cristallisant en fines plaquettes hexagonales [3].

**Boudchicha et al [29]**, en étudiant l'effet de l'activité des additions minérales sur les résistances en compression des mortiers, ont montré que les coefficients d'activité de ces additions étaient très variables et dépendaient de leur nature minéralogique, du taux de substitution du ciment et de l'âge du mortier. Les additions calcaires présentent le plus fort coefficient d'activité à 07 jours et la fumée de silice à 28 jours à 10 % du taux de substitution du ciment.

Il en résulte que l'effet chimique, lorsqu'il est favorable, est complémentaire à l'effet physico-chimique et microstructural. Son action sur les propriétés du matériau durci se mesure par la modification du volume et de la nature des produits hydratés formés. Néanmoins, leur forte synergie empêche toute distinction claire entre ces deux effets. Pour cette raison, ces deux effets peuvent être associés dans une notion unique plus large qui est celle de la contribution des additions minérales à l'activité liante du ciment [3].

### **II.3 Action des additions minérales sur les propriétés des mortiers et des bétons :**

Dans cette partie nous allons analyser les effets des différentes additions minérales sur les mortiers et bétons à l'état frais et à l'état durci en général et des additions calcaires en particulier.

#### **II.3.1 la fumée de silice :**

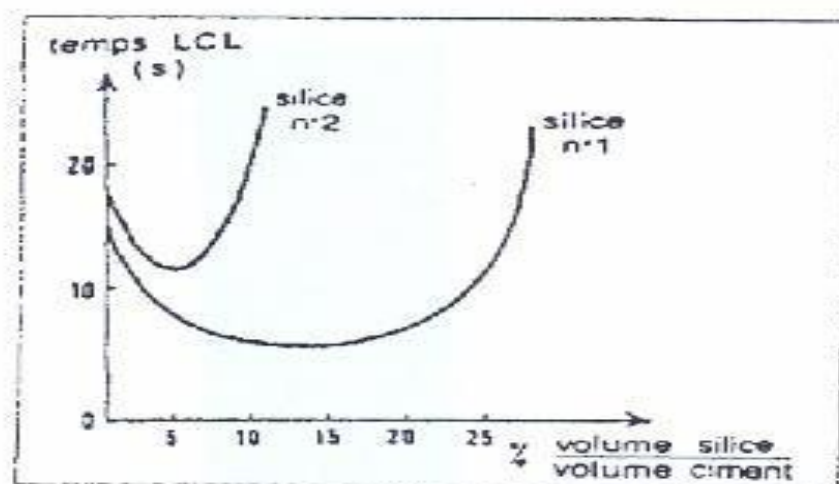
Se sont des sous produits de la fabrication du silicium ou de ferrosilicium. Ils se présentent sous forme de microsphères de silice ayant des diamètres moyens de  $0,1\ \mu\text{m}$ . la surface spécifique varie de 20 à 25  $\text{m}^2/\text{g}$ . Les fumées de silice se caractérisent par une structure vitreuse (produit très réactif) avec une haute teneur en silice (de 75 à 95%).

Les fumées de silice agissent de trois façons dans les bétons : action physique, physico- chimique et pouzzolanique. En effet, l'action physique consiste à chasser l'eau qui se trouve entre les particules de

ciment, ce qui plastifie le béton ayant un rapport E/L de 0,15 à 0,20. L'action physico-chimique se manifeste par un bouchage des pores de 0,1 mm de diamètre à partir de l'âge de 7 jours, ce qui rend le béton à la fumée de silice tout à fait imperméable.

Action sur les mortiers et les bétons à l'état frais :

**De Larard et al [30]** ont montré que l'effet favorable de la fumée de silice sur l'empilement granulaire des matériaux cimentaire était représenté par une variation de la maniabilité d'un mortier en fonction de la quantité de la fumée de silice incorporée, (figure II.5).



**Figure II.5** Effet de la fumée de silice sur la maniabilité d'un mortier selon **De Larard & al [30]**

**Zhang et Han [22]** ont montré aussi, en étudiant l'effet des additions ultrafines sur les propriétés rhéologiques des pâtes de ciment, que Lorsque le taux de substitution du ciment par des additions de fumée de silice est inférieur à 15 %, la viscosité de la pâte est réduite remarquablement.

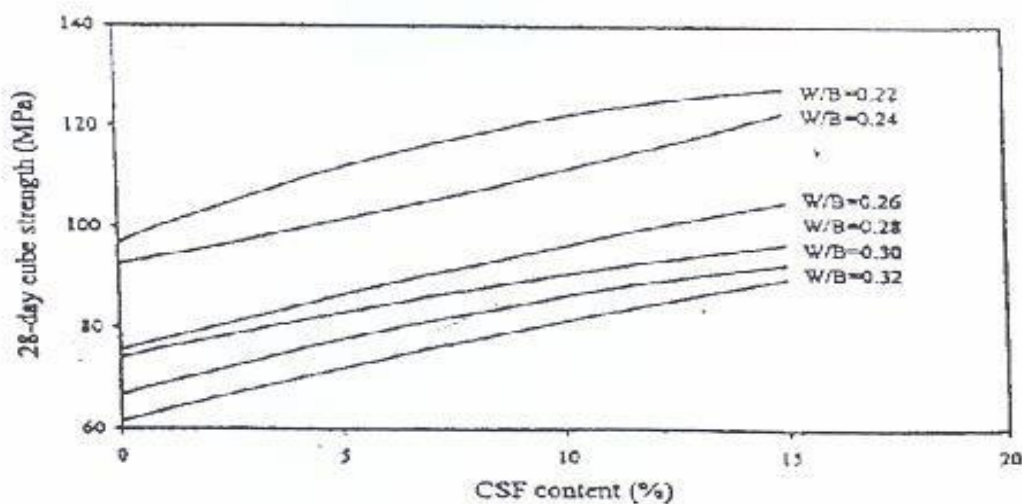
Certains chercheurs ont montré que pour des dosages en ciment de 200, 300 et 400 kg/m<sup>3</sup>, on peut ajouter respectivement jusqu'à 2, 4 et 6% de fumée de silice sans augmenter le seuil de rigidité du béton avec une amélioration de la viscosité plastique. Ceci est attribué à l'amélioration du dosage supérieurs inversent le phénomène par augmentation des frictions entre les fines. Le béton devient très riche, très collant et très cohésif.

Action sur les mortiers et les bétons à l'état durci :

L'action pouzzolanique de la fumée de silice permet, en réagissant très vite avec la chaux libérée lors de l'hydratation, de produire un CSH très dense qui permet des gains de résistances en compression dès l'âge de 7 jours [31, 32].

**Appa Rao [33,34]** a montré qu'une augmentation des résistances en compression, indépendamment de l'âge du mortier, est engendrée par l'incorporation d'une fumée de silice dans un mortier dans la limite de 30 % de substitution du ciment par l'addition pour un rapport eau/liant constant égal à 0.5.

**Kwan [35]** a montré que, la résistance en compression des mortiers à 28 jours, quelque soit le rapport eau/liant, augmente avec la teneur en fumée de silice dans la limite de 15% de substitution du ciment par l'addition (Figure II.6).



**Figure II.6** Variation des résistances en compression à 28 jours des mortiers en fonction de la teneur en fumée de silice pour différents rapports eau/liant, selon **Kwan [35]**

**Demirboga [36]** a montré en étudiant l'influence des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers, que l'incorporation de 10% de fumée de silice, engendrait une amélioration de la résistance en compression à 7,28 et 120 jours.

Selon les travaux de recherche qu'on a vu précédemment, on remarque que l'introduction de l'addition fumée de silice n'as aucun effet positif sur les résistances mécaniques à jeunes âges des mortiers et des bétons, par contre une amélioration très importantes des résistances mécaniques à moyen et long terme a été montrée.

### II.3.2 Les cendres volantes :

Les cendres volantes utilisées dans les ciments et les bétons sont produites dans les centrales thermiques utilisant du charbon pulvérisé. Elles se présentent sous forme d'une poudre de couleur plus ou moins foncée suivant sa teneur en carbone et en impureté. Les cendres volantes sont sous forme de particules sphériques vitreuses, pleines ou creuses. La granulométrie s'échelonne de 1 à 200  $\mu\text{m}$  et, en général, 50% des particules ont un diamètre inférieur à 30  $\mu\text{m}$ . leur surface spécifique Blaine varie entre 250 et 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  (domaine analogue à celui des ciments).

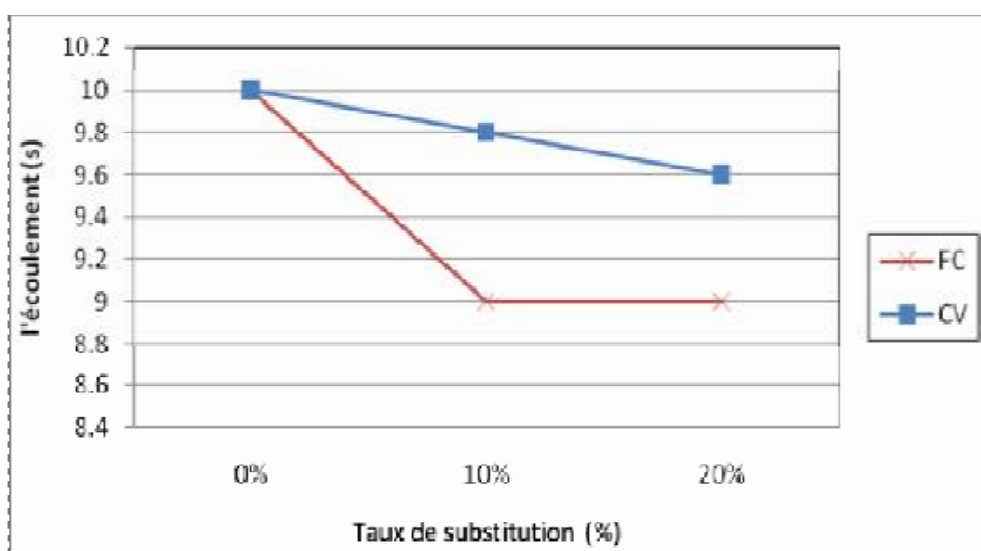
La norme ASTM C-618-80 regroupe les cendres volantes en deux grandes classes suivant leur composition chimique :

- La classe F riche en oxyde ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ ) avec une teneur faible en chaux ( $\text{CaO} < 10\%$ ). Elle est qualifiée de silicoalumineuse avec un faible potentiel pouzzolanique.
- La classe C riche en chaux ( $\text{CaO} > 10\%$ ), avec une teneur en oxyde supérieur à 50%. Elle est qualifiée de silicocalcaire avec un potentiel pouzzolanique élevé.

### Action sur les mortiers et les bétons à l'état frais

Il est rapporté que certaines cendres volantes peuvent avoir un effet retardateur de l'ordre d'une ou plusieurs heures sur la prise du ciment, probablement en raison de la libération de sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) présents à la surface des particules de cendres volantes, celles ci présentent un effet chimique défavorable. Ainsi, seul le début de prise est décalé, l'intervalle de temps entre la prise et le durcissement restant inchangé. Ce retard peut être avantageux dans le cas d'un bétonnage par temps chaud ; dans le cas contraire il peut être nécessaire d'utiliser un accélérateur de prise [1].

Une légère amélioration de la fluidité des mortiers par l'addition des cendres volantes été observée par **Chahinez A [31]**. Cette amélioration est relative au taux de substitution du ciment par les cendres volantes(CV) ; le temps d'écoulement diminue avec l'augmentation du taux de substitution comme cela est illustré dans la figure II.7.

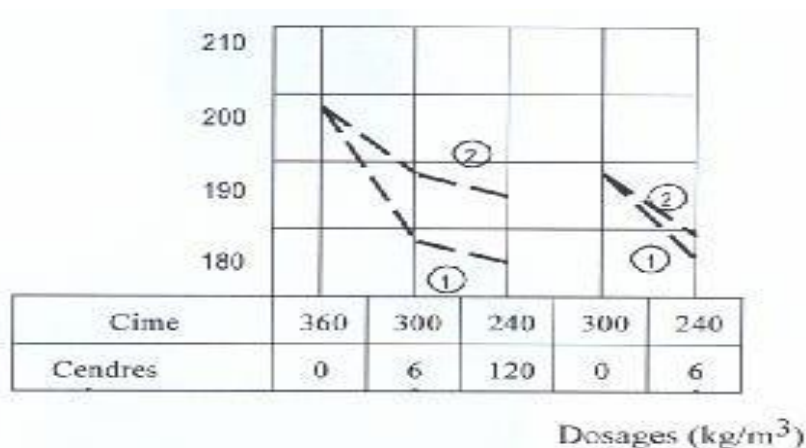


**Figure II.7** Variation de l'écoulement en fonction du taux des additions **Chahinez A [31]**

Comme rapporté par plusieurs auteurs : les cendres volantes empêchent les particules de ciment de se former dans des blocs.

**Lange & al [37]**, ont conclu que pour une fluidité donnée, l'introduction d'une quantité spécifique de cendres volantes réduisait la quantité d'eau et augmentait la fluidité du mélange. Ce comportement a été expliqué par la forme sphérique des particules qui facilitent l'empilement granulaire et réduisent les frictions inter-particulaires. La forme sphérique réduit aussi le rapport de la surface par le volume des particules, ce qui engendre une demande en eau plus réduite [38].

Il existe une optimisation des propriétés du squelette granulaire (un effet granulaire) selon la finesse, la morphologie, la nature et la quantité choisies, par la substitution d'une partie du ciment par des cendres volantes dans une formulation de béton. Cela conduit à la réduction progressive de la demande en eau pour une même consistance en raison du caractère sphérique non poreux des particules de cendres volantes [33,39] (figure II.8).

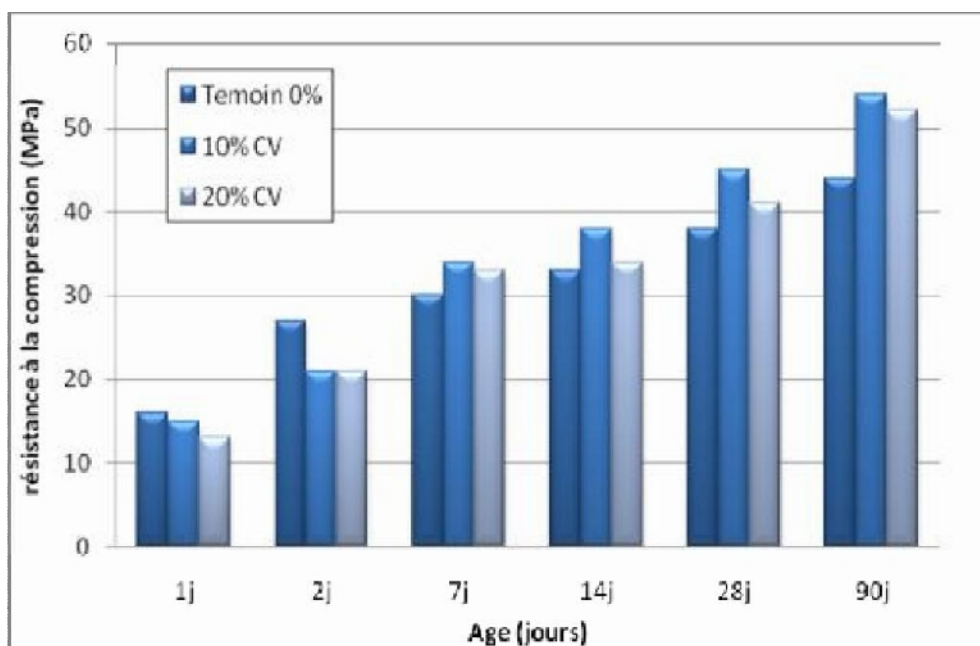


**Figure II.8** Réduction de la demande en eau apportée par l'introduction de deux cendres volantes dans une formulation de béton [33,39]

Lorsque le taux de substitution du ciment par des cendres volantes est inférieur à 15 %, la viscosité de la pâte est réduite remarquablement [22].

#### Action sur les mortiers et les bétons à l'état durci

**Chahinez A [31]** à montré que le mortier à base de 20% de cendres volantes a développé de plus faibles résistances par rapport à celui avec 10% de cendres volantes; et des résistances en compression moindres au jeune âge et plus élevés à 90 jours par rapport au mortier de référence.



**Figure II.9** Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge pour les deux taux de substitution de cendre volante **Chahinez A [31]**

**Demirboga [36]** a montré en étudiant l'influence des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers, que les cendres volantes engendraient une diminution de la résistance en compression à tout âge et pour toutes les quantités.

### **II.3.3 La pouzzolane :**

Les pouzzolanes sont des matériaux, naturels ou artificiels, capables de réagir en présence d'eau avec l'hydroxyde de chaux pour donner naissance à des composés nouveaux, stables, peu solubles dans l'eau et possédant des propriétés liantes [4].

#### **Action sur les mortiers et les bétons à l'état frais**

**Aichouba et al [40]** ont montré en étudiant l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10% à 30% engendre une augmentation de la consistance normale, une diminution du temps de prise.

#### **Action sur les mortiers et les bétons à l'état durci**

**Houhou et Mazghiche [41]** ont montré en étudiant l'influence de l'ajout pouzzolanique sur le comportement mécanique de la pâte de ciment, que la plus grande partie de l'évolution de la résistance mécanique et par conséquent de l'effet pouzzolanique qui y est associé se produisait à partir de l'âge de 7 jours.

**Aichouba et al [40]** ont montré en étudiant l'effet de la pouzzolane naturelle de Béni-saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, que la substitution du ciment par la pouzzolane de 10% à 30% engendre une diminution des résistances mécaniques à jeunes âges et une conservation de ces résistances à long terme.

### II.3.4 Le laitier de haut fourneau

Les laitiers sont des sous-produits de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Ce sont des silico-aluminates de chaux traités de différentes façons à la sortie du haut fourneau :

- Par refroidissement brusque dans l'eau ou dans l'air : ceci empêche la cristallisation et permet son utilisation dans les ciments et les bétons comme pouzzolane,
- Par refroidissement lent à l'air : ceci donne un matériau cristallisé sans aucun pouvoir liant qui est utilisé comme granulats pour les travaux routiers et dans les bétons.

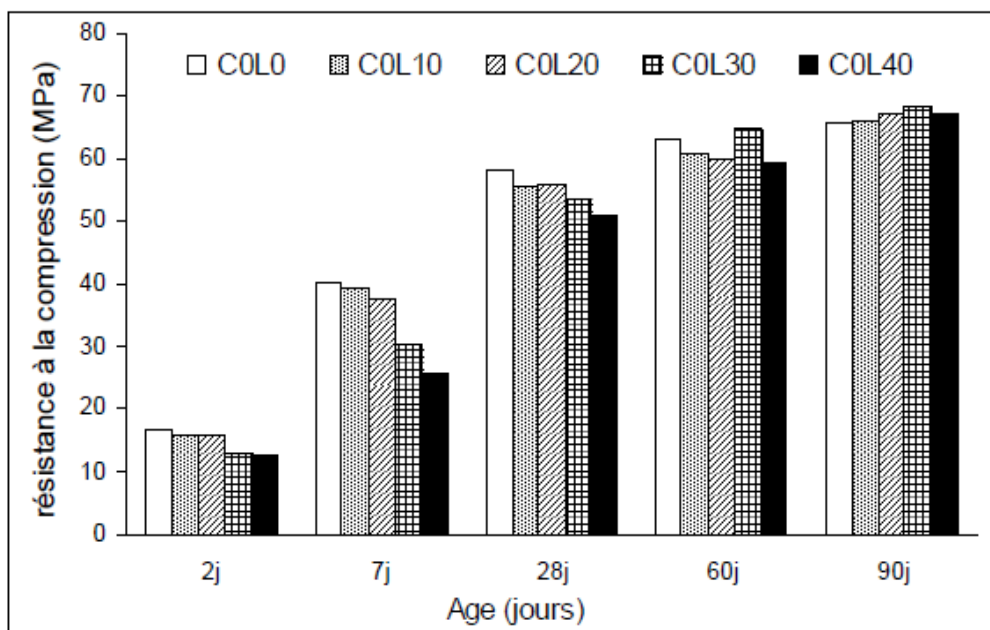
#### Action sur les mortiers et les bétons à l'état frais

**Boudchicha A et al [21]** ont montrés, on étudiant la variation de la demande en superplastifiant SP1 pour des mortiers confectionnés a base de deux ciments C1 et C2 substitués partiellement par des additions de laitier granulé de hauts fourneaux (BFS) de finesse de 2900 cm<sup>2</sup>/g ont une demande en superplastifiant plus importante que les additions calcaires et de pouzzolanes et qui augmente avec le taux de la substitution de ciment.

#### Action sur les mortiers et les bétons à l'état durci

**Demirboga [36]** a montré en étudiant l'influence des additions minérales sur la résistance en compression des mortiers, que le laitier granulé de haut fourneau engendrait une diminution de la résistance en compression à 28 jours et une amélioration à 120 jours.

**Toufik Boubekour et al [42]** ont montrés que la substitution du ciment par du laitier a donné des résistances à la compression faibles à jeune âge (2 à 7 jours). Ceci est du à la faible activité hydraulique du laitier granulé d'El Hadjar [42,43]. Cependant, la résistance des ciments au laitier se rapproche à celle du CEM I à 90 jours, particulièrement pour les ciments avec 20 % et 30 % de laitier.



**Figure II.10** Effet du pourcentage de laitier sur la résistance à la compression [42]

### II.3.5 Les fillers calcaires:

Les produits désignés dans le commerce comme fillers sont des poudres fines à granulométrie contrôlée, dont les plus gros grains ne dépassent pas 80 microns obtenus par broyage ou par pulvérisation de certaines roches (calcaires, basalte, bentonite, cendres volantes .....). Les fillers se différencient les uns des autres par:

- leur origine, leurs compositions chimiques et minéralogiques, leurs défauts de structure, les impuretés qu'ils contiennent.
- leur finesse, la forme des grains, leur état de surface, leur dureté, leur porosité.

Les calcaires peuvent avoir des origines géologiques différentes, métamorphique (il s'agit de marbres) ou sédimentaire. Ils peuvent aussi exister sous plusieurs formes polymorphiques (calcite, aragonite, vaterite).

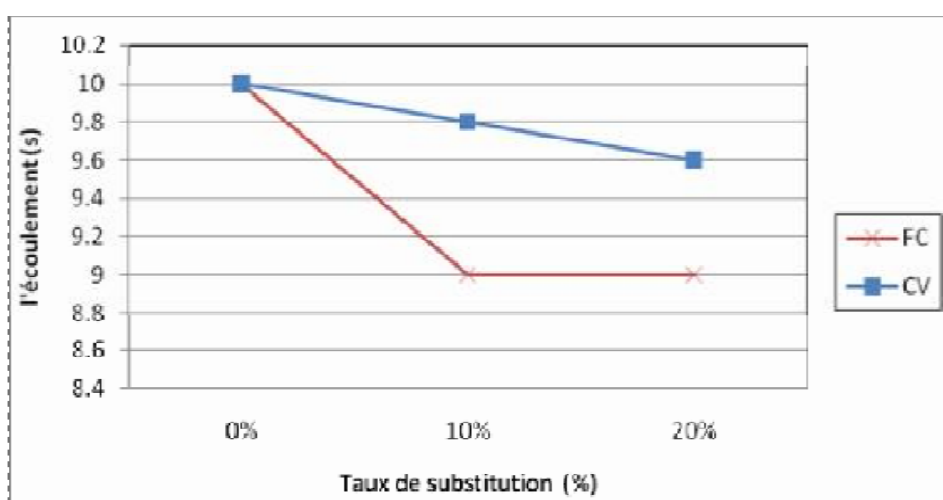
Leur composition chimique est celle du carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) mais ils peuvent contenir aussi du magnésium (sous forme  $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$ ), s'il réagit de calcaires dolomitique.

L'utilisation des fillers calcaires dans l'industrie du ciment et du béton est assez récente. Les additions calcaires dans les matrices cimentaires ont déjà fait l'objet de plusieurs études, essentiellement en France et aux Etats-Unis d'Amérique [33, 32].

### Action sur les mortiers et les bétons à l'état frais

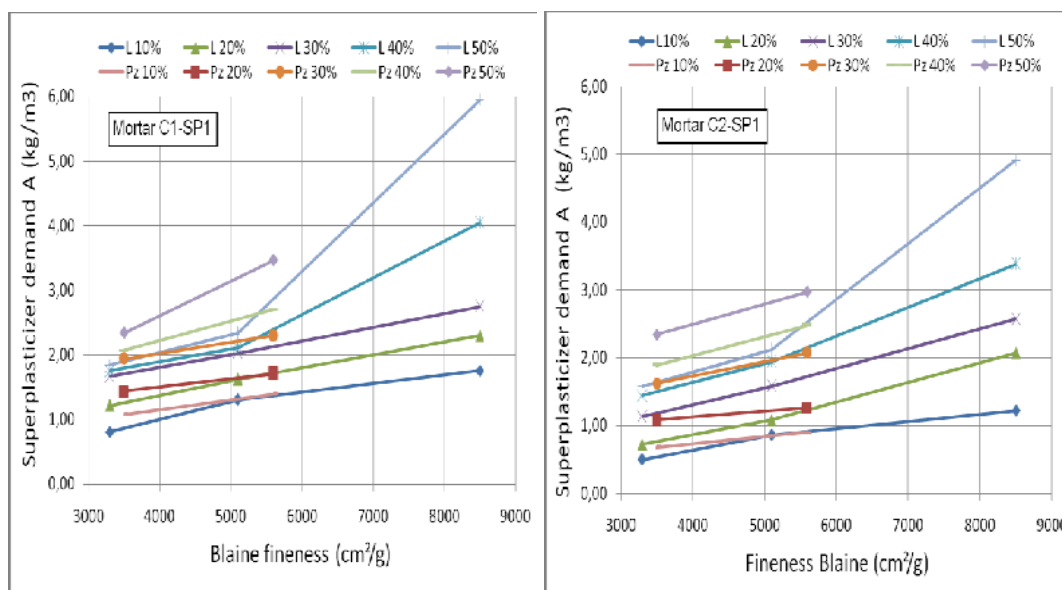
Les additions calcaires, en présence des produits hydratés du ciment, forment des carboaluminates de calcium hydratés, **Baron et Ollivier [3]**.

**Chahinez A [31]** à montré, on étudiant la maniabilité des mortiers de fillers calcaires, une amélioration importante de la fluidité des mortiers obtenus par la substitution en masse du ciment par deux pourcentage de l'addition calcaire 10% et 20%. Mais cette amélioration est indépendante du taux de substitution de ciment (figure II.11).



**Figure II.11** Variation de l'écoulement en fonction du taux des additions **Chahinez A [31]**

Cette amélioration de la consistance a été aussi montrée par **Boudchicha et al [21]**, pour des taux de substitution inférieurs à 20% et une finesse des additions calcaires inférieures à 5500 cm<sup>2</sup>/g. **Boudchicha et al [21]** ont aussi démontré, que la demande en superplastifiant est plus importante pour les additions de plus grande finesse et elle est d'autant plus importante que le taux de substitution du ciment par l'addition est grand.



**Figure II.12** Variation de la demande en superplastifiant des mortiers C1 et C2 en fonction de la finesse de l'addition Boudchicha et al [21]

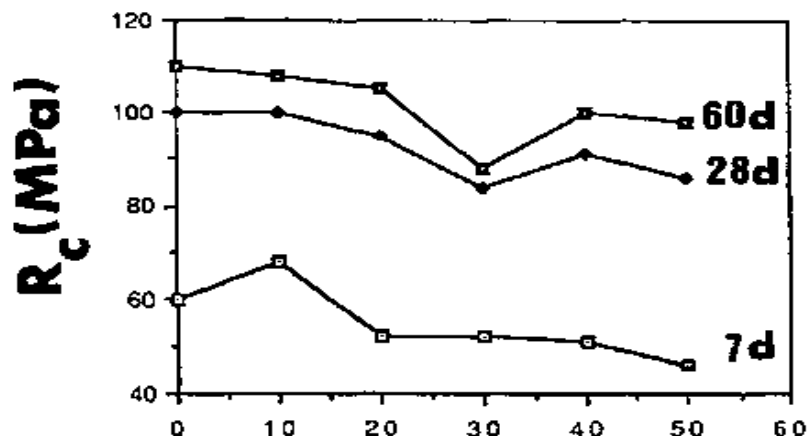
#### Action sur les mortiers et les bétons à l'état durci

On a vu dans le premier chapitre que le taux et l'accélération de l'hydratation du  $C_3S$  conduit à des résistances importantes à jeune âge des matériaux cimentaires. En se basant sur ce constat, plusieurs auteurs ont montrés l'effet favorable de l'addition calcaire sur les résistances à jeune âge des mortiers et des bétons.

**Nonat [44]**, a montré, par calorimétrie, que l'hydratation du silicate tricalcique  $C_3S$  est plus rapide en présence des fines calcaires.

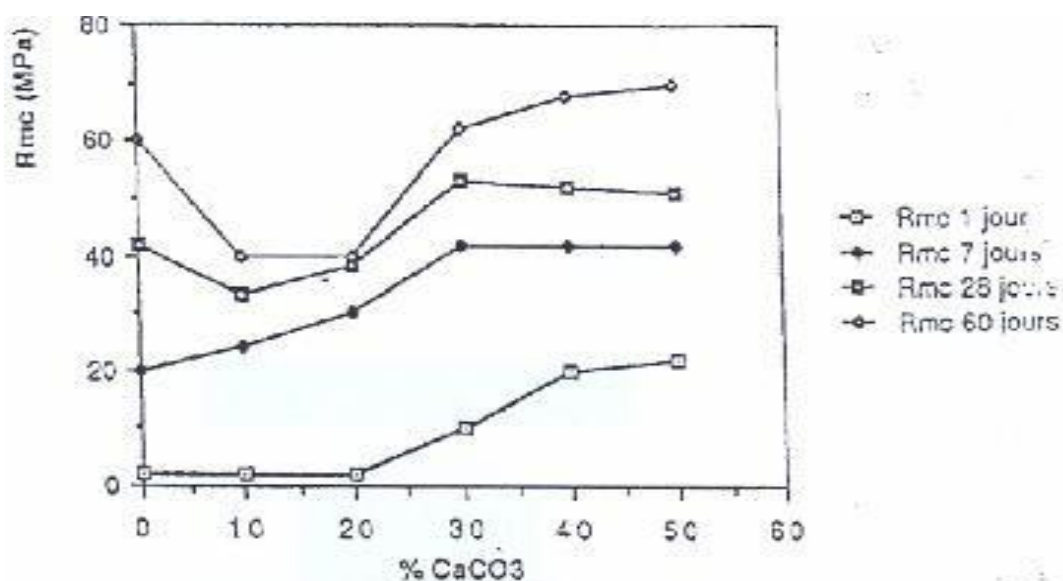
**Benzet [45]** a montré, en remplaçant du ciment par addition calcaires, que la présence du carbonate de calcium ( $CaCO_3$ ) favoriserait l'hydratation du  $C_3S$  dès les premiers instants d'autant plus que les particules sont fines et la quantité de  $CaCO_3$  est importante (jusqu'à 15 à 20 % en masse).

**Jean Péra et al [46]** ont montré, en étudiant l'effet de quantités différentes de carbonate de calcium sur l'hydratation de silicate tricalcique  $C_3S$  pour expliquer les changements physico-chimiques se produisant pendant l'hydratation de ciment Portland, que le carbonate de calcium a un effet accélérant sur  $C_3S$  et hydratation de ciment et mène à la précipitation du calcium carbo-silicate l'hydrate. Ceci conduit à des résistances importantes à 7 jours en substituant 10 % du ciment par l'addition calcaire.



**Figure II.13** Les résistances en compression de colles de ciment contenant de différentes quantités de  $\text{CaCO}_3$  selon **Jean Péra et al** [46]

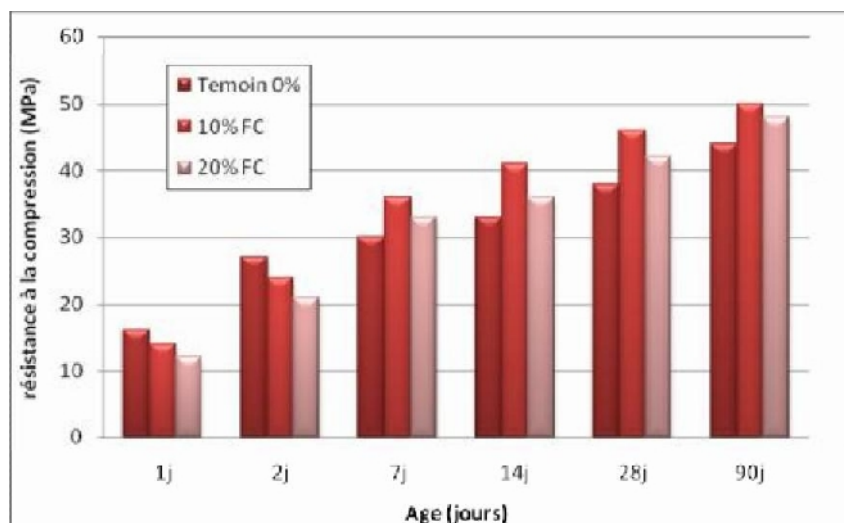
Pour une analyse physico-chimique et mécanique des interactions ciment fillers dans les mortiers, **Husson** [47] a montré que l'utilisation des additions minérales dans certaines proportions pouvait avoir un effet retardateur plus important que l'effet accélérateur aux jeunes âges (effet physico-chimique).



**Figure II.14** Variation des résistances en compression des pâtes cimentaires en fonction de la teneur en  $\text{CaCO}_3$  à différentes échéances selon **Husson** [47]

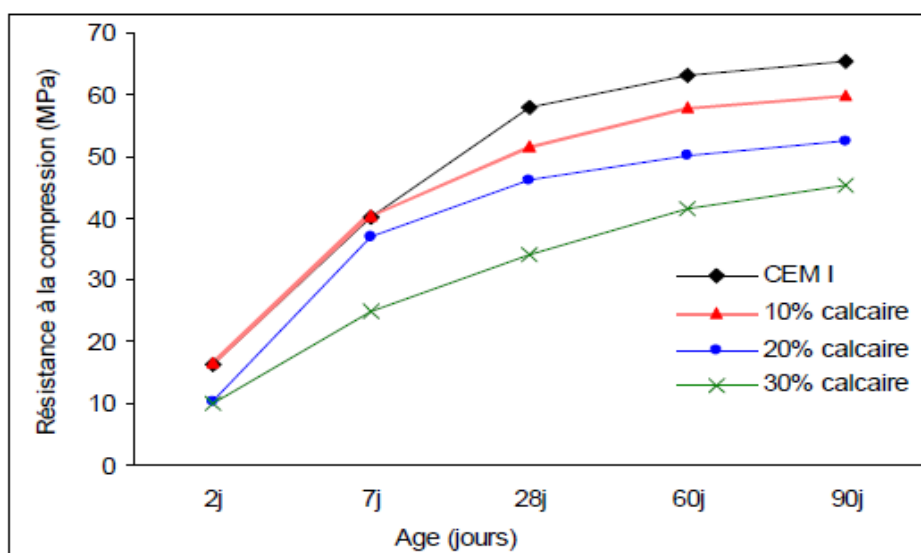
**Chahinez A** [31] à montré, en étudiant la résistance mécanique des mortiers de fillers calcaires, qu'à 7 et 14 jours ; les mortiers avec calcaires donnent des résistances légèrement supérieures au mortier sans addition (mortier témoin) et que cet avantage n'est pas durable car pour les échéances supérieures, les mortiers contenant l'addition calcaire présente les mêmes résistances pour un taux

de substitution donné. la figure montre que le mortier à base de 20% de l'addition a développé les plus faibles résistances par rapport à 10% (figure II.15).



**Figure II.15** Variation de la résistance à la compression en fonction de l'âge Pour les deux taux de substitution de filler calcaire **Chahinez A [31]**

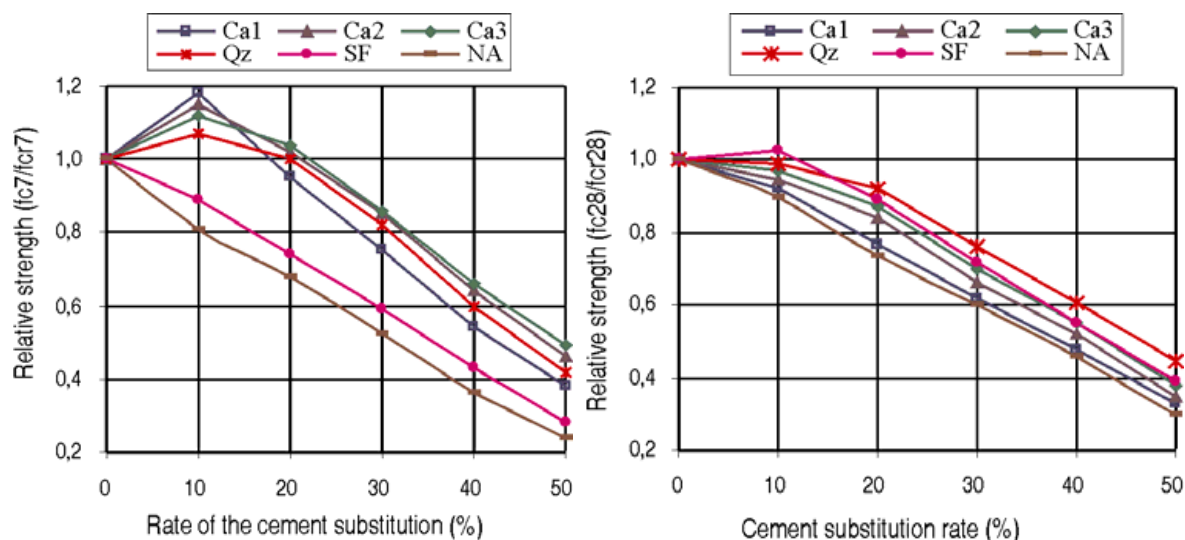
**Toufik Boubekeur et al [42]**, ont montrés que la résistance à la compression est similaires à celle du mortier contrôle de 15.96 % pour une substitution de 10 % de calcaire à 2 jours, ensuite elle diminue de 37 % pour une substitution de 20 % de calcaire. A l'âge de 28 jours, la résistance à la compression diminue de 11 % et de 20% avec l'augmentation du pourcentage du calcaire de 10 % à 20 % respectivement.



**Figure II.16** Evolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des mortiers contenant le calcaire **[42]**.

**Boudchicha et al [48]** ont montré que l'incorporation des additions calcaires dans les mortiers permettait d'améliorer les résistances à 07 jours jusqu'à 18 % à 10 % du taux de substitution du

ciment par l'addition, mais cette amélioration n'est pas maintenue à 28 jours et les résistances des mortiers avec additions calcaires sont plus faibles que celles du mortier de référence.



**Figure II.17** Effet de la substitution du ciment par les additions sur les résistances en compression à 07 et 28 jours selon Boudchicha et al [48].

Les chercheurs ont donc confirmé, que les résistances mécaniques des mortiers confectionnés avec des additions calcaires sont faibles par rapport à celles du mortier sans addition à plus longue échéance.

#### II.4 Synthèse :

L'étude bibliographique sur les effets engendrés par les différentes additions minérales sur les mortiers et bétons, permet de relever que les additions minérales peuvent apporter des modifications significatives à l'état frais et durci des matériaux cimentaires. Ces modifications peuvent résulter d'un effet granulaire, physico-chimique ou chimique qui dépend de la nature de l'addition minérale, de sa finesse, ou de sa morphologie

Les additions calcaires peuvent avoir des effets favorables ou défavorables sur la consistance des matériaux cimentaires à l'état frais en fonction de la finesse des grains. Plusieurs études ont montré que jusqu'à une certaine finesse des additions calcaires, l'incorporation de ces additions permettait d'avoir une augmentation de la fluidité ou une réduction du besoin en eau ou en superplastifiant.

Les additions calcaires qui sont considérées comme des additions du type I par les normes, peuvent parfois accélérer l'hydratation du ciment et permettre aux mortiers et bétons d'atteindre des résistances significatives à courts termes. Ceci a été relevé par plusieurs auteurs mais les résistances obtenues ne sont pas convaincantes à 28 jours dans certains cas.

Dans cette étude, nous nous proposons donc de combiner l'apport que peut engendrer la réduction en eau des additions calcaires et appréhender jusqu'à quelle mesure les résistances à courts termes peuvent être améliorées sans nuire aux résistances à 28 jours, en utilisant des fines calcaires disponibles dans le marché de l'est Algérien (ENG Khroub).

*Partie II*

*Etude*

*Expérimentale*

---

### CHAP III Caractérisation des matériaux utilisés et différents essais effectués

#### III.1 Introduction

Les études récentes qui ont considéré l'influence des additions minérales sur les propriétés des matériaux cimentaires ont montré que celles-ci, par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, peuvent engendrer dans certains cas des modifications significatives dans les propriétés rhéologiques et mécaniques des matériaux cimentaires. Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, mais plusieurs études dans ce domaine l'accordent pour distinguer trois principaux effets qui se superposent pour influencer les propriétés du matériau cimentaire à l'état frais et durci.

- Un effet granulaire qui agit sur la compacité, le besoin en eau ou adjuvant et les propriétés rhéologiques des mélanges à l'état frais.
- Un effet physico-chimique et microstructural qui agit sur les propriétés physiques, mécaniques et microstructural des matériaux durcis.
- Un effet chimique qui résulte de la réactivité plus ou moins forte de certaines phases minérales, qui agit en complémentarité à l'effet physico-chimique et microstructural.

En proposant d'étudier l'influence de l'utilisation de trois additions calcaires différentes par leur finesse sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons, nous souhaitons contribuer à dégager des règles plus précises pour maîtriser leurs utilisations sur des bases rationnelles. Car, outre la réponse aux besoins technologiques évidente, l'utilisation de cette addition minérale dans les matériaux cimentaires constitue aussi un enjeu économique et scientifique.

Afin de pouvoir procéder au dosage correct des différents composants d'une matrice cimentaire d'une part, et d'expliquer les tendances observées dans les résultats, d'autres part, il est indispensable de faire plusieurs types d'identification.

Les essais de caractérisations des matériaux utilisés dans cette étude sont effectués aux laboratoires suivants : - laboratoire LNHC de Oum Bouaghi.

- laboratoire de la cimenterie de Tébessa

Les caractéristiques chimiques et les courbes granulométriques des additions calcaires sont déterminées à partir de leur fiches techniques

## III.2 Caractérisation des matériaux utilisés

### III.2.1 Méthodes utilisées pour la caractérisation

Les matériaux de base utilisés sont :

- ✓ Les ciments : il s'agit de deux ciments, un ciment CEM I, et un ciment CEM II),
- ✓ Des fillers calcaire,
- ✓ Du sable 0/5,
- ✓ Des graviers (5/8 et 8/15)
- ✓ et l'eau.

Les essais effectués sur les constituants sont :

#### III.2.1.1 Mesure de La finesse :

La finesse des trois fillers et des deux ciments a été déterminée par deux méthodes conformes à la **Norme NF EN 196-6**

- La première est obtenue par tamisage et sert à détecter la présence de grosses particules du matériau. Cette méthode d'essai est avant tout appropriée à la vérification et au contrôle du procédé de production.
- La deuxième est obtenue par la détermination de la surface spécifique Blaine de chaque type de ciment en utilisant la méthode de perméabilité à l'air par l'appareil Blaine.

##### a- La méthode par tamisage : Norme NF EN 196-6 :

Le procédé d'essai peut être résumé comme suit :

On fait agiter l'échantillon de ciment à essayer en le secouant pendant 2 min dans un récipient bouché, pour disperser les grumeaux.

Attendre 2 min, remuer doucement la poudre résultante en utilisant une baguette sèche et propre, de façon à distribuer les fines dans tout le ciment.

Placer le récipient sous le tamis (tamis de 90  $\mu$ ). Peser approximativement 10 g de ciment à 0.01 g près et les placer dans le tamis en prenant soin d'éviter toute perte. Disperser les grumeaux de ciment. Fixer le couvercle sur le tamis. Agiter le tamis par des mouvements tournoyants, planétaires et linéaires jusqu'à ce que plus aucun matériau fin ne passe à travers le fond du tamis. Enlever et peser le résidu.



***Figure III.1 Tamis électrique***

Exprimer cette masse en pourcentage ( $R_1$ ) de la masse de la quantité placée initialement dans le tamis à 0.1% près. Enlever délicatement tout le matériau fin adhérent à la partie inférieure du fond, et le placer dans le réceptacle.

Répéter toute la procédure en utilisant une prise fraîche de 10 g pour obtenir  $R_2$ . Calculer le refus du ciment R par la moyenne arithmétique de  $R_1$  et  $R_2$  exprimée en pourcentage à 0.1% près. Si les résultats diffèrent de plus de 1% absolu, exécuter un troisième tamisage et calculer ensuite la moyenne des trois tamisages.

b- La méthode par perméabilité à l'air (méthode Blaine): Norme NF EN 196-6 :

Le liant hydraulique dont on désire mesurer la surface spécifique doit être à porosité constante (égale à 0,500).

Le procédé d'essai peut être résumé comme suit :

- Peser à 0,01 g près, une masse  $m$  de liant telle que, compte tenu de son volume  $V$  après tassement dans la cellule, sa porosité soit égale à 0,500.
- La masse de matière à prendre s'écrit:  $m = (1 - e) \rho v$ .

$\rho$  : Masse volumique

$v$  : volume utile de la cellule.

\*Placer la grille au fond de la cellule. Appliquer sur cette grille, au moyen d'une tige à face inférieure plane et d'une équerre, un disque neuf de papier-filtre.

\*Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir.

\*Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant, puis placer sur celui-ci un autre disque neuf de papier filtre.

- \*Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule.
- \*Retirer le piston lentement (Il est commode de pratiquer une légère rotation alternative).
- \*Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur.
- \*Enduire de vaseline la partie ronde de la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartir la vaseline; veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.
- \*Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau de liquide atteint le deuxième trait.
- \*L'arrêter quand le niveau de liquide atteint le troisième trait.
- \*Noter le temps écoulé  $t$  ainsi que la température de la pièce.
- \*Faire trois mesures et prendre la moyenne arithmétique des trois temps.

\*La surface spécifique est calculée par la formule:

$$S = K \cdot \sqrt{t} \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{p^3}}{1-p} \cdot \frac{1}{\sqrt{0.1 \cdot \eta}}$$

Tel que :

$S$  : Surface spécifique ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

$k$  : Constante de l'appareil.

$p$  : Porosité de la couche tassée.

$t$  : Temps mesuré en secondes.

$\rho_c$  : Masse volumique ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$\eta$  : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).



***Figure III.2*** Appareil Blaine

➤ Caractéristiques physiques des ciments :

Les ciments utilisés dans cette étude sont :

- ✓ C1 : Un ciment CPJ-CEM II/A 42,5 provient de la cimenterie de Tébessa.
- ✓ C2 : Un ciment CPA CEM I /42,5R provient de l'importation de la Tunisie « ciment JBEL OUST ».

***Tableau III.1*** *Caractéristiques physiques des ciments*

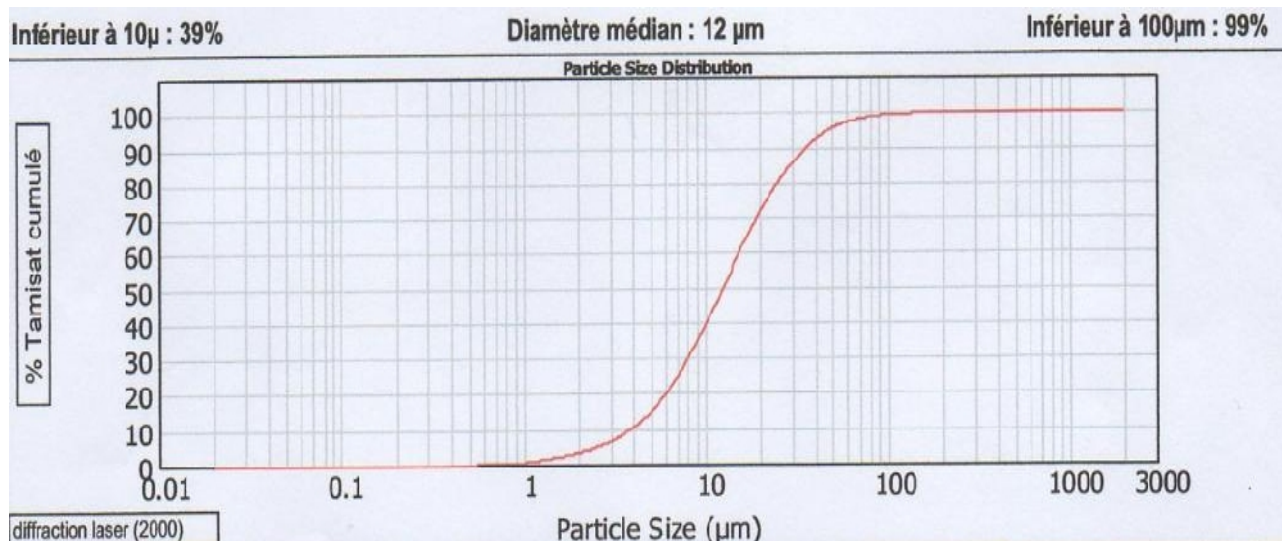
<b>Ciment</b>	<b>Module de finesse Mf (%)</b>	<b>Surface spécifique (Blaine) cm<sup>2</sup>/g</b>
<b>C1</b>	20,8	3810
<b>C2</b>	9,00	4150

➤ Caractéristiques physiques des fillers:

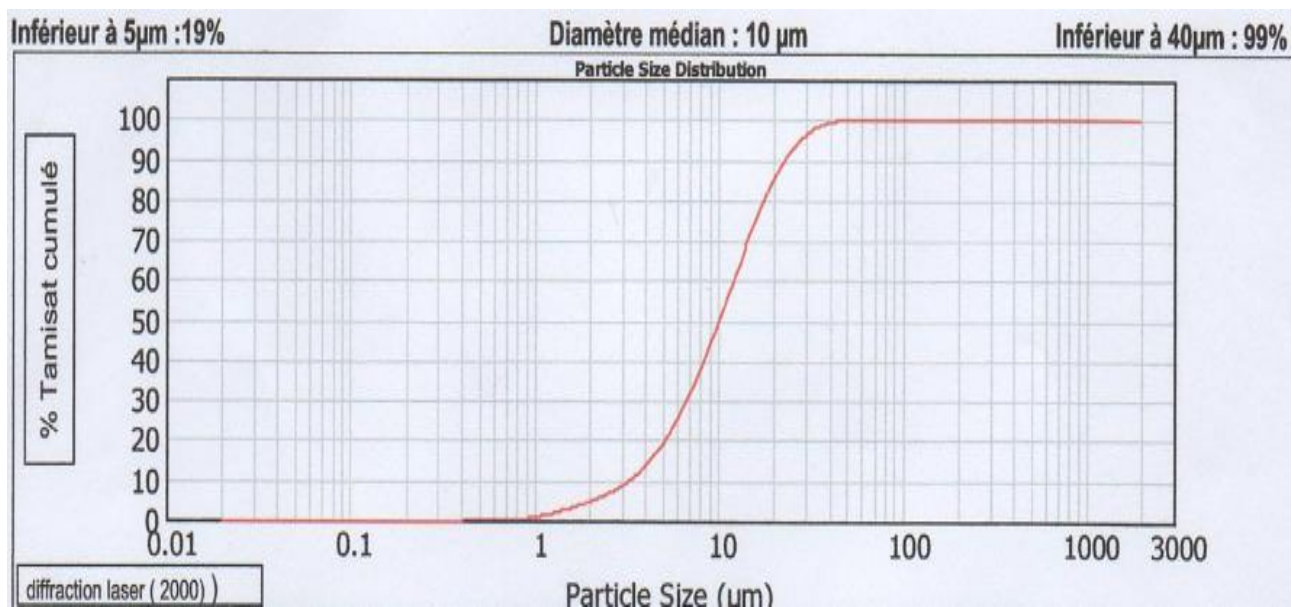
***Tableau III.2*** *Caractéristiques physiques des fillers*

<b><u>Fillers calcaires</u></b>	<b>F15</b>	<b>F10</b>	<b>F5</b>
Surface spécifique de Blain (cm <sup>3</sup> /g)	2442	3289	4231
Finesse	5 %	0 %	0 %
Dureté (Mohs)	3	3	3
Poids spécifique	2,7	2,7	2,7
Densité apparente non tassée	0,96	0,90	0,81
Prise d'huile (NF.T30.022)	22g/100g de poudre	23g/100g de poudre	26g/100g de poudre
Prise DOP (NF.T30.022)	31g/100g de poudre	32g/100g de poudre	34g/100g de poudre
Humidité à l'ensachage	0,01 %	0,02 %	0,02 %
Indice de réfraction	1,71	1,71	1,71

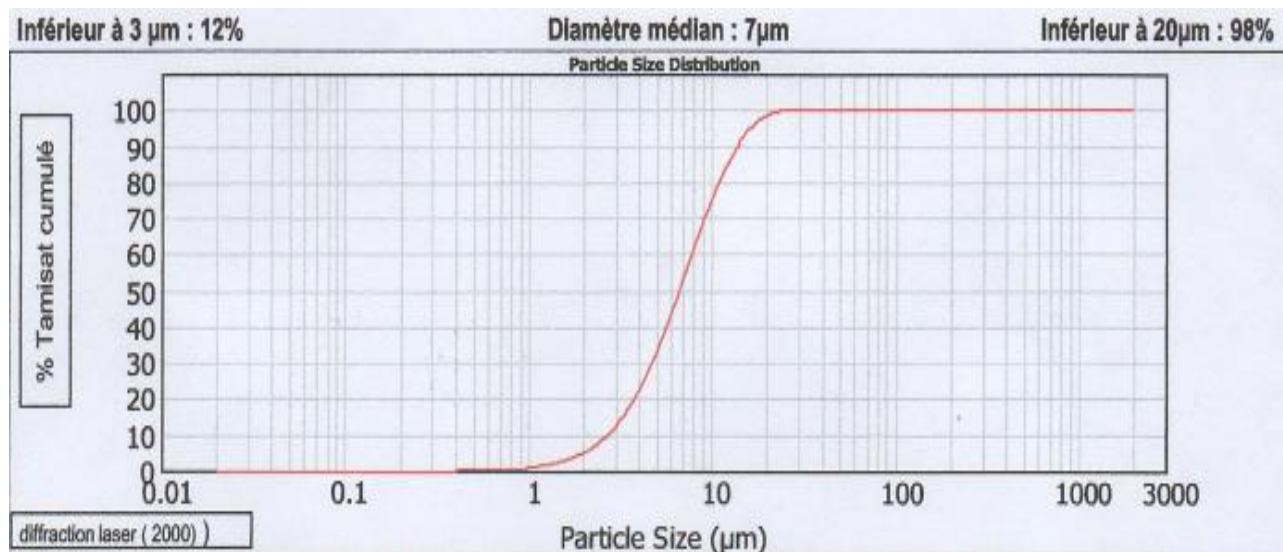
- Répartition granulométrique des fillers calcaires :
  - a- Fillers calcaires F15 :



- b- Fillers calcaires UF10 :



c- Fillers calcaires UF5s :



### III.2.1.2 La composition chimique et minéralogique :

Nous avons procédé à une analyse chimique de différents matériaux de base en utilisant la diffraction par rayons x (La fluorescence aux rayons x) Norme P 15-467(Figure III.3).



**Figure III.3** Diffraction par rayon x (fluorescence x)

Les taux des composants minéralogiques ont été déterminés par les formules de BOGUE :

- $C_3S = 4.071 C - 7.602S - 6.719A - 1.430F.$
- $C_2S = 8.602S + 1.079F + 5.068A - 3.070C.$
- $C_3A = 2.650A - 1.692F.$
- $C_4AF = 3.043F.$

Tel que : C : CaO ; S : SiO<sub>2</sub> ; A : Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ; F : Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

➤ Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment C1 :

Les caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment utilisé sont présentées dans le tableau **III.3**:

***Tableau III.3 composition chimique et minéralogique du ciment C1***

Composition chimique (%)									
CEM II	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF
	64.81	19.98	5.24	2.94	1.27	2.32	0.49	0.009	10.07
Composition minéralogique (Bogue)									
Phases	C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF		
Pourcentage(%)	55.50		9.65		8.01		8.04		

➤ Caractéristiques chimiques et minéralogiques du ciment C2:

. Les caractéristiques chimiques et minéralogiques sont présentées dans le tableau **III.4**.

***Tableau III.4 composition chimique et minéralogique du ciment C2***

Composition chimique (%)									
CEM I	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	PF
	64.50	20.01	4.92	2.95	1.31	1.94	0.59	0.006	9.4
Composition minéralogique (Bogue)									
Phases	C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF		
Pourcentage(%)	73.27		2.23		8.05		8.97		

Ce ciment doit être conforme à la norme NF P 15-301. Il est constitué d'au moins 95 % de clinker, le reste étant des constituants secondaires. La classe 42,5 signifie une résistance inférieure caractéristique de 42,5 MPa à 28 jours respectée à 95 %, la résistance moyenne mesurée étant voisine de 55 MPa [4].

- Les résistances garanties en compression sur mortier normalisé sont représenté dans le tableau suivant:

**Tableau III.5** Résistances garanties en compression sur mortier normalisé des ciments C1et C2

Classe du ciment	Résistances minimales en MPa garanties à 2 jours	Résistances minimales en MPa garanties à 28 jours
42.5	10	40
42.5 R	18	40

➤ Caractéristiques chimiques des fillers calcaires:

Les additions calcaires utilisées sont des matériaux de même nature mais de surface spécifique différente, ils proviennent du gisement El-khroub qui occupe la partie sud ouest du massif Oum Settas au sud-est de Constantine, il est constitué de calcaire d'origine néritique caractérisé par une grande pureté chimique et une blancheur élevée.

Les trois additions de calcaires utilisés sont:

- ALCAL F15: L15.
- ALCAL UF10: L10.
- ALCAL UF5s: L5.

Les trois types de fillers utilisés ont les mêmes caractéristiques chimiques et les mêmes éléments toxiques représentés dans les tableaux ci-dessous :

**Tableau III.6**Caractéristiques chimiques des additions calcaires

Composant chimique	taux (%)
CaCO <sub>3</sub>	98 %
CaO	56,03 %
SiO <sub>2</sub>	0,04 %
Na <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03 %
MgO	0,17 %
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02 %
K <sub>2</sub> O	0,02 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,008 %
TiO <sub>2</sub>	0,009 %

Chlorure	0,0033 %
SO3 (soluble dans l'eau)	0,0021 %
SO3 (soluble dans l'acide)	0,19 %
Soufre totale	0,0137 %
Résidu insoluble	1,15 %
Solubilité dans l'eau(Ws)	0,24 %
Perte au feu	43 %
PH	9

Les éléments toxiques	
Cyanure	0,045 µg /gr
Mercuré	0,35 µg /gr
Arsenic	0,08 µg /gr
Fluor	0,02 µg /gr

### **III.2.1.3 Caractéristiques physiques des granulats utilisés :**

Les granulats utilisés sont des granulats naturels calcaires concassés de la carrière de Djebel Loutssalit de Dafri d'Ain Fakroune de granulométrie continue de classes 0/5, 5/8, et 8/15.

#### ***\*Analyse granulométrique (NF P 18-560) :***

L'essai d'analyse granulométrique a été réalisé conformément à la norme NF P 18-560

Les caractéristiques granulométriques des agrégats sont présentées dans les tableaux suivants :

**Tableau III.7 Granulométrie du sable 0/5**

Tamis Ouverture (mm)	Refus cumulés (gr)	Refus cumulés (%)	Passants (%)
6.3	0	0	100
5	82.8	41.4	95.86
4	162.0	8.1	91.9
2.50	469.5	23.47	76.53
1.25	923.7	46.18	53.82
0.63	1284.8	64.24	35.76
0.315	1527.7	76.38	23.61
0.16	1695.9	84.79	15.21
0.08	1978.2	98.91	1.09
Fond de tamis	2000	100	0

**Tableau III.8 Granulométrie du gravier 5/8**

Tamis Ouverture (mm)	Retenus cumulés (gr)	Retenus cumulés (%)	Passants (%)
8	2584.7	86.16	13.84
6.3	2981.0	99.37	0.63
5	3000	100	0

**Tableau III.9 Granulométrie du gravier 8/15**

Tamis Ouverture (mm)	Retenus cumulés (gr)	Retenus cumulés (%)	Passants (%)
14	0	0	100
12.5	970.5	32.35	67.65
10	2182.4	72.75	27.25

**\*Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598) :**

Cet essai consiste à plonger un poids défini de sable dans une éprouvette normalisée remplie par une solution de flocculant ; après agitation, on laisse décanter le mélange pendant 20 minutes, ensuite on mesure la hauteur du sédiment (H1 et du sédiment + flocculant H2).

L'équivalent de sable est donné par la relation suivante : **ES= H1/H2 \*100**

L'équivalent de sable permet de quantifier la notion de propreté d'un sable, la présence d'un excès d'argile peut provoquer une augmentation du retrait et une forte demande en eau ce qui entraînera une baisse de résistance mécanique, cependant un manque total de fines conduit à des bétons peu maniables, ségrégations et de faibles compacité. L'équivalent de sable est d'autant plus élevé que la teneur en argile est faible.

**E.S = 78.34** : Un sable propre, approprié à l'utilisation dans les bétons destinés à la préfabrication et à la précontrainte.

**\*Essai Los Angeles (NF P 18-573) :**

Cet essai consiste à mesurer la résistance des granulats à la fragmentation par chocs et à l'usure par frottements.

Le coefficient Los Angeles est calculé par la formule suivante :

**LA = p\*100/5000** Les granulats sont qualifiés comme suit :

- **LA < 15** .....très bon ;
- **15 ≤ LA ≤ 20** ..... bon à moyen ;
- **20 ≤ LA ≤ 30** ..... moyen à faible ;
- **LA ≥ 30** ..... médiocre.

Le coefficient Los Angeles est d'autant plus élevé que le granulat est moins bon.

Le coefficient Los Angeles des granulats utilisés dans cette thèse est : **LA = 18.99 %**. Donc ce sont des granulats concassés est considéré comme bons à moyens pour un usage dans les bétons de préfabrication.

**Tableau III.10** Caractéristique des granulats utilisés

classes	Densité apparente	Poids spécifique	Equivalent de sable
0/5	1.64	2.72	78.34
5/8	1.40	2.73	-
8/15	1.36	2.73	-

**L'Eau** : L'eau utilisée dans la formulation des mortiers et des bétons est l'eau de robinet de la région d'Oum Bouaghi.

**III.3 Programme expérimental:**

Notre travail expérimental est réalisé dans le laboratoire des matériaux et béton au niveau de l'université d'Oum Bouaghi et le laboratoire LNHC Oum El Bouaghi.

Ce programme expérimental sera réalisé en trois phases :

- ✓ **Effet des additions calcaires sur les propriétés des mortiers à E/C constant** : dans cette phase, nous étudierons, l'influence des fines calcaires sur la maniabilité et les résistances en compression à courts et moyen termes des mortiers, qui en découlent. Une attention particulière sera donnée à l'effet de la quantité, de la finesse et de la nature du ciment sur les résultats obtenus.
- ✓ **Effet des additions calcaires sur les propriétés des mortiers à maniabilité constante** : dans cette phase, nous étudierons, l'influence des fines calcaires sur le besoin en eau et les résistances en compression à court et moyen termes des mortiers, qui en découlent. L'indice d'activité des additions sera apprécié après maîtrise de l'effet granulaire. Une attention particulière sera donnée à l'effet de la quantité, de la finesse et de la nature du ciment sur les résultats obtenus.
- ✓ **Effet des additions calcaires sur les bétons à maniabilité constante** : dans cette phase nous validerons les résultats obtenus pour les mortiers sur les bétons en utilisant les quantités optimales d'additions calcaires et le ciment le plus adapté à la recherche des résistances à courts termes.

#### **III.4 Les différents essais effectués :**

L'objectif de ce travail est l'étude de l'influence des fillers calcaires sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons.

Pour atteindre cet objectif il faut procéder à des essais normalisés au laboratoire effectués sur des mélanges de mortier et de béton comme suit :

##### ➤ **Les essais sur les mortiers :**

- essai de consistance par la table à secousses.
- résistance en compression des mortiers.

##### ➤ **Les essais sur le béton :**

- essai d'affaissement au cône d'Abrams.
- résistance en compression des bétons.

#### **III.4.1 Essais sur mortier :**

La préparation des mortiers doit suivre un procédé uniforme afin d'obtenir des matériaux comparables.

##### a- **Préparation du mortier :**

L'essai adopté sera conforme à la norme NF EN 196-1, et se déroulera comme suit :

- verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment ;
- mettre alors immédiatement le malaxeur en marche à vitesse lente et après 30 s, introduire régulièrement tout le sable (pendant les 30 s suivantes). Lorsqu'il est fait usage de fractions de sable

séparées, ajouter successivement les quantités spécifiées de chaque fraction en commençant par la plus grosse. Mettre le malaxeur à sa vitesse la plus grande et continuer à mélanger pendant 30 s supplémentaires.

- arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.

- reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

La durée des diverses périodes de malaxage doit être observée à  $\pm 1$  s près.

**b- Essai de consistance par la table à secousses :**

L'essai adopté sera conforme à la norme NF EN 1015-3, et se déroulera comme suit :

- Avant chaque essai, essuyer le disque ainsi que la surface intérieure et les bords du moule à l'aide d'un chiffon humide, laisser sécher et lubrifier légèrement les surfaces à l'aide d'une huile minérale non résineuse de très basse viscosité. Si la table n'a pas été utilisée durant les dernières 24 h, effectuer 10 secousses avant l'utilisation.

- Placer le moule au centre du disque de la table secousses et introduire le mortier.

La consistance de référence a été évaluée en mesurant l'étalement du mortier à l'état frais sur une table à secousses. Le mortier frais étant placé dans un moule tronconique, en acier inoxydable ou en laiton, de  $60 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  de hauteur, présentant un diamètre intérieur de  $100 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  à la base et de  $70 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  au sommet. La surface intérieure et les bords du moule sont lisses. Les plans contenant les bords supérieur et inférieur sont perpendiculaires à l'axe du moule. L'épaisseur minimale de la paroi du moule est de 2,0 mm.

- La mise en place du mortier frais dans le moule est effectuée en deux couches, chaque couche étant compactée par au moins 10 coups brefs de dame afin d'assurer un remplissage uniforme du moule.

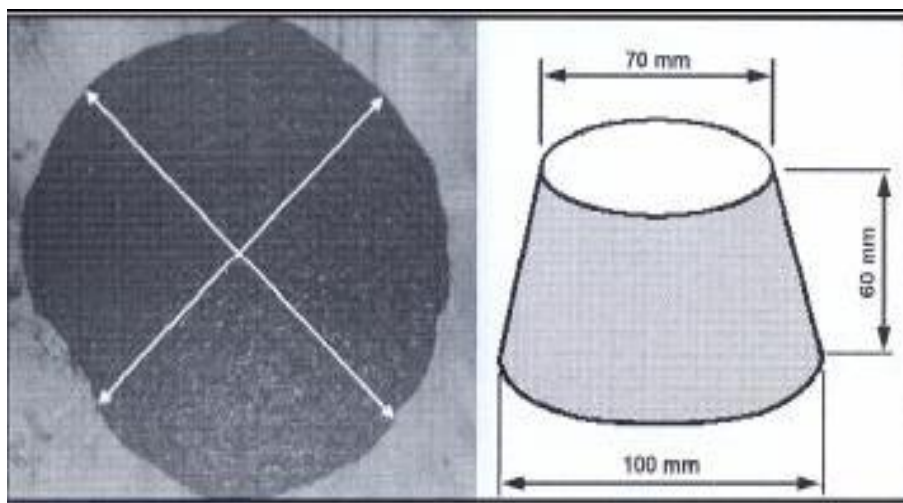
- Durant le remplissage, maintenir fermement d'une main le moule sur le disque.

- Eliminer l'excédent de mortier à l'aide d'un couteau araser et essuyer la surface libre du disque afin qu'elle soit propre et sèche, en prenant soin d'ôter toute l'eau autour du bord inférieur du moule.

- Au bout d'environ 15 s, soulever lentement et verticalement le moule et étaler le mortier sur le disque en imprimant 15 secousses à la table, à une fréquence constante d'environ 1 secousse par seconde.

La valeur de l'étalement considéré, constitue la moyenne de la mesure de l'étalement du mélange à l'aide du pied coulisse sur deux directions perpendiculaires (figure III.4) à 1 mm près.

**N.B.** : Ne disposant pas de ce matériel au niveau du laboratoire du département de Génie Civil, nous avons confectionné le moule tronconique et nous avons adopté une méthodologie d'essai constante proche de la norme.



**Figure III.4** *Mesure de l'étalement pour les mortiers à l'état frais*

c- **L'essai de compression des mortiers :**

Pour chaque mortier, on a préparé des éprouvettes de 50 mm x 50 mm x 50 mm. La mise en place des mortiers dans les moules est effectuée en deux couches qui subissent sur une table à chocs 60 secousses en 60 secondes par couche.

Les moules sont alors conservés dans une chambre humide pendant 24 heures à une température de 20 °C et plus de 95 % d'humidité relative. Après démoulage, les éprouvettes sont conservées immergées dans un bac d'eau à une température de  $20 \pm 2$  °C, jusqu'à l'échéance de l'essai.



**Figure III.5** Bac de conservation d'éprouvettes à température contrôlée

Les essais de compression ont été évalués à 1j, 2j, 3j, 7j et 28 jours en utilisant une machine de compression. La valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement des trois éprouvettes T1, T2 et T3(T indique Test).



**Figure III .6** Machine de compression

### III.4.2 Essais sur béton :

La préparation des bétons a été effectuée conformément à la norme NF P 18-404. Les constituants du béton sont introduits dans la cuve du malaxeur dans l'ordre suivant : gros éléments, liant et sable ; l'eau étant rajouté après 01 minute de malaxage à sec. Le malaxage de l'ensemble est poursuivi pendant 02 minutes.

#### ➤ **Formulation du béton :**

Les bétons préparés pour la réalisation des essais ont été confectionnés en utilisant la méthode de Dreux-Gorisse.

Elle est d'autre part très simple et il est toujours possible de procéder à des essais de convenance pour améliorer les propriétés du béton désiré.

Les caractéristiques des bétons de référence pour le ciment C2 ont été définies comme suit :

- Diamètre du plus gros granulats : 15 mm,
- Affaissement au cône d'Abrams :  $7 \pm 1$  cm (béton plastique),
- Résistance caractéristique exigée :  $f_{c28} = 25$  MPa.

Les procédures suivies pour la préparation des bétons, l'affaissement au cône d'Abrams, la confection des éprouvettes, le stockage, et la mesure des résistances en compression ont été réalisées conformément aux procédures décrites précédemment.

La composition théorique du béton de référence à base de ciment C2 obtenue par la méthode Dreux-Gorisse a été ajustée jusqu'à la vérification des conditions d'affaissement au cône d'Abrams ( $7 \pm 1$  cm) et de résistance en compression ( $f_{c28} \geq 25$  MPa), pour le béton de référence.

#### **a- Affaissement au cône d'Abrams (slump test) :**

L'essai conforme à la norme NF P 18-451 consiste à constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre.

L'équipement nécessaire à l'essai comprend un moule tronconique sans fond de 30 cm de hauteur, 20 cm de diamètre inférieur et 10 cm de diamètre supérieur, une plaque d'appui, une tige de piquage et un portique de mesure. Les étapes suivies pour la réalisation de cet essai, consistent à humidifier la plaque d'appui, huiler légèrement le moule tronconique, introduire le béton dans le moule en trois couches de hauteurs égales mises en place avec la tige de piquage qui est actionnée 25 fois par couche, araser le béton sur le bord supérieur en roulant la tige de piquage horizontalement et procéder au démoulage en

soulevant le moule avec précaution. Le béton n'étant plus maintenu, il s'affaisse plus ou moins en fonction de sa consistance.

Après 01 minute du démoulage, nous mesurons à l'aide du portique, la hauteur d'affaissement jusqu'au point le plus haut du béton frais. La mesure arrondie au centimètre, caractérise l'affaissement.

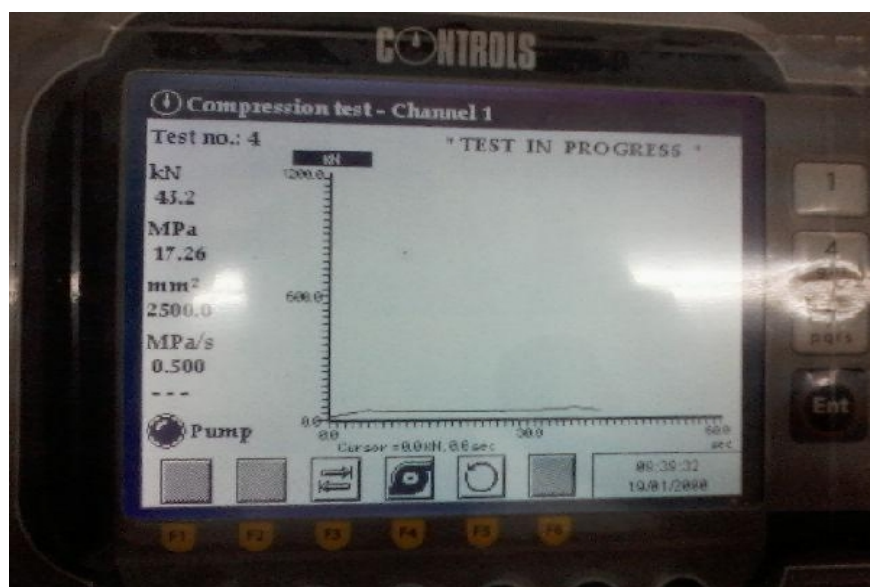
#### **b- Résistance en compression du béton :**

Conformément à la norme NF P 18-430, les résistances en compression des bétons ont été mesurées sur des éprouvettes cubiques de dimensions  $10*10*10 \text{ cm}^3$  après une mise en place du béton frais par piquage conformément à la norme NF P 18-404.

L'essai de compression sur les éprouvettes de béton a été réalisé conformément à la norme NF P 18-406. Dans ce cas l'éprouvette étudiée est soumise à une charge croissante jusqu'à la rupture.

La résistance en compression est donnée directement par la machine de compression en affichant sur l'écran la valeur de celle-ci ; la force et la contrainte de rupture ainsi que la courbe contrainte-déformation de l'éprouvette testée.

L'essai a été réalisé sur trois éprouvettes, et la valeur de la résistance considérée constitue la moyenne de la contrainte d'écrasement de trois éprouvettes.



***Figure III.7 Ecran d'affichage de la machine de compression***

### **III.5 Synthèse :**

Les essais physiques, les analyses chimiques et les analyses minéralogiques effectués dans les différents laboratoires donnent une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des mortiers et des bétons qui seront étudiés aux chapitres suivants du point rhéologique et mécanique. Ainsi, la connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux et voire l'incidence de ces paramètres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons.

## Chapitre IV Résultats et discussions

### IV.1 Introduction :

Nous avons vu dans les chapitres précédents que les additions minérales pouvaient apporter plusieurs modifications sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des mortiers et bétons [36,41]. Ces modifications peuvent être dues principalement à trois effets [14], un effet granulaire, un effet physico-chimique, et/ou un effet chimique.

L'étude de ce mémoire porte sur l'analyse de l'action des fines calcaires sur les propriétés rhéologiques (maniabilité), et mécaniques (résistances en compression) des mortiers et bétons, en s'intéressant particulièrement aux jeunes âges. L'effet des fines calcaires sera analysé en procédant à la substitution massique du ciment par les additions calcaires dans les mélanges de mortiers et bétons.

Trois types d'additions calcaires disponibles sur le marché local (ENG Khroub), ont été utilisés, il s'agit des additions :

- ✓ ALCAL F15: L15.
- ✓ ALCAL UF10: L10.
- ✓ ALCAL UF5s: L5.

Une attention particulière sera donnée à l'étude de l'effet de la quantité et de la finesse des additions calcaires sur la maniabilité et les résistances en compression à 1, 2, 3, 7 et 28 jours, des mortiers et bétons, tout en analysant l'influence de la nature du ciment sur ces paramètres en considérant dans l'étude deux types de ciments :

- ✓ Le ciment C1 : CPJ CEM II 42.5
- ✓ Le ciment C2 : CPA CEM I 42.5 R

A ce titre, l'effet des fines calcaires sur la consistance des mortiers et bétons sera apprécié par l'évaluation d'étalement des mortiers à l'état frais sur la table à secousse pour des rapports E/L constants ou par les besoins en eau des mortiers à maniabilité constante. L'effet des fines calcaires sur les résistances en compression des mortiers et bétons sera apprécié en évaluant l'évolution des résistances en compression des mortiers, à taux fixes de fines calcaires ainsi que la variation des résistances en compression des mortiers avec additions calcaires à divers échéances de murissement en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.

Dans ce chapitre, nous allons considérer trois phases d'études :

- 1- **Effet des additions calcaires sur les propriétés des mortiers à E/C constant** : dans cette phase, nous étudierons, l'influence des fines calcaires sur la maniabilité et les résistances en compression à courts et moyen termes des mortiers, qui en découlent. Une attention particulière sera donnée à l'effet de la quantité, de la finesse et de la nature du ciment sur les résultats obtenus.
- 2- **Effet des additions calcaires sur les propriétés des mortiers à maniabilité constante** : dans cette phase, nous étudierons, l'influence des fines calcaires sur le besoin en eau et les résistances en compression à court et moyen termes des mortiers, qui en découlent. Une attention particulière sera donnée à l'effet de la quantité, de la finesse et de la nature du ciment sur les résultats obtenus.
- 3- **Effet des additions calcaires sur les bétons à maniabilité constante** : dans cette phase nous validerons les résultats obtenus pour les mortiers sur les bétons en utilisant les quantités optimales d'additions calcaires et le ciment le plus adapté à la recherche des résistances à courts termes.

## **IV.2 Effet des additions calcaires sur les mortiers avec E/C Constant**

Dans cette partie, nous désignons par :

M1 : les mortiers confectionnés à base du ciment C1 ;

M2 : les mortiers confectionnés à base du ciment C2

M1-L : pour les mortiers confectionnés à base du ciment C1, avec additions calcaires.

M2-L : pour les mortiers confectionnés à base du ciment C2, avec additions calcaires.

Tel que L indique le type (Diamètre moyen) de filler calcaire substitué au ciment (L=0, L=5, L=10 et L=15).

### **IV.2.1 Effet des fillers calcaires sur la maniabilité des mortiers:**

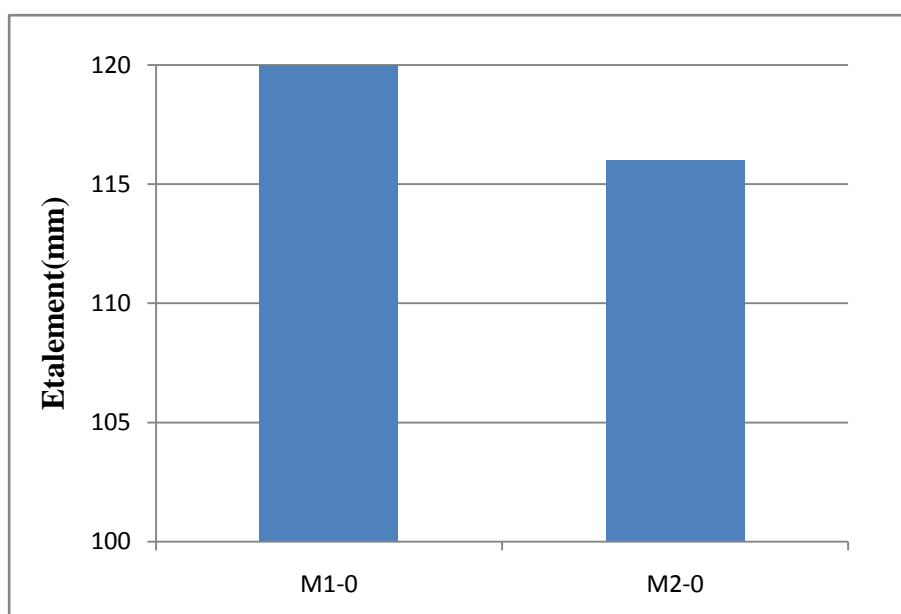
Les mesures d'étalement sur la table à secousses nous ont permis d'étudier pratiquement et simplement les principaux effets des additions calcaires sur la consistance des mortiers à l'état frais.

Les résultats d'étalement pour les mortiers à base des ciments C1 et C2 sans addition sont récapitulés dans le **tableau IV.1**

**Tableau IV.1** *Etalement des mortiers de références à base de ciment C1 et C2 (E/C constant)*

Mortier	E/C	Type de ciment	Etalement (mm)
M1-0	0.5	C1	120
M2-0	0.5	C2	116

La figure IV.1 présente la variation de l'étalement sur la table à secousse des mortiers de références du ciment C1 et C2 sans additions.

**Figure IV.1** *Etalement sur la table à secousse des mortiers témoins M1 et M2 à E/C=0,5*

On remarque dans cette figure que l'étalement à la table à secousse, à E/C constant (E/C=0.5), du mortier de référence à base du ciment C1 est égale à 120 mm et est plus important par rapport à celui du mortier de référence à base du ciment C2 qui est égale à 116 mm. Cette différence peut être expliquée par la différence de finesse des deux ciments utilisés, sachant que le ciment C1 a une surface spécifique égale à  $3810 \text{ cm}^2/\text{g}$  et un module de finesse de 20,8 alors que le ciment C2 présente une surface spécifique de  $4150 \text{ cm}^2/\text{g}$  et un module de finesse de 9,00. En effet plus les grains de ciment sont fins et plus le mélange est sec à même quantité d'eau.

Les résultats d'étalement pour les mortiers à base de ciment C1 et C2 avec additions calcaires de différentes finesses pour les différents taux de substitution du ciment sont récapitulés successivement dans les **tableaux IV.2** et **IV.3**.

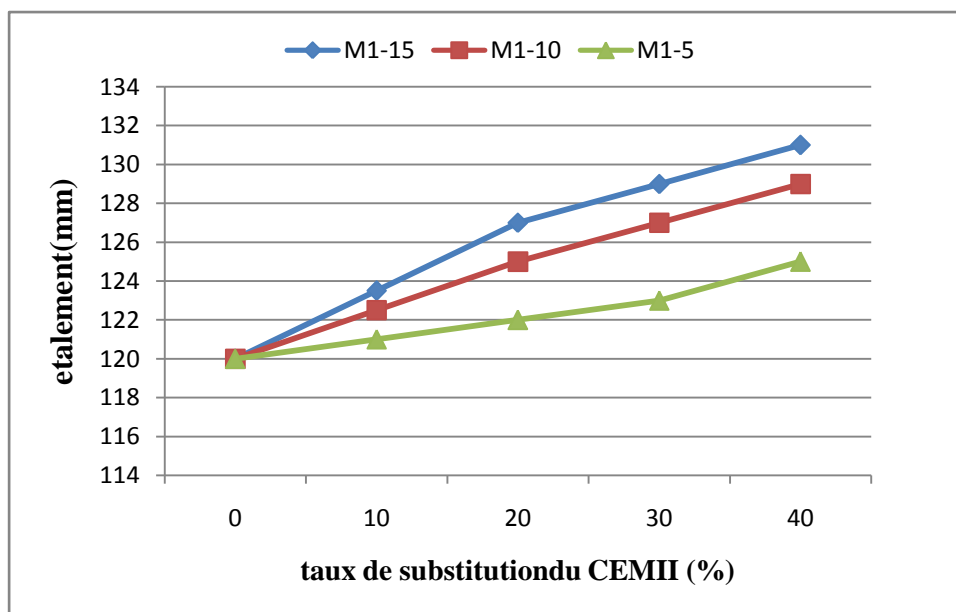
**Tableau IV.2** *Etalement des mortiers à base de ciment C1 avec additions calcaires (E/L constant):*

Mortier	E/L	Type de ciment	Taux de substitution en fillers calcaires(%)			Etalement (mm)
			L15(%)	L10(%)	L5(%)	
M1-0	0.5	C1	0	0	0	120
M1-15	0.5	C1	10	0	0	123,5
M1-15	0.5	C1	20	0	0	127
M1-15	0.5	C1	30	0	0	129
M1-15	0.5	C1	40	0	0	131
M1-10	0.5	C1	0	10	0	122,5
M1-10	0.5	C1	0	20	0	125
M1-10	0.5	C1	0	30	0	127
M1-10	0.5	C1	0	40	0	129
M1-5	0.5	C1	0	0	10	121
M1-5	0.5	C1	0	0	20	122
M1-5	0.5	C1	0	0	30	123
M1-5	0.5	C1	0	0	40	125

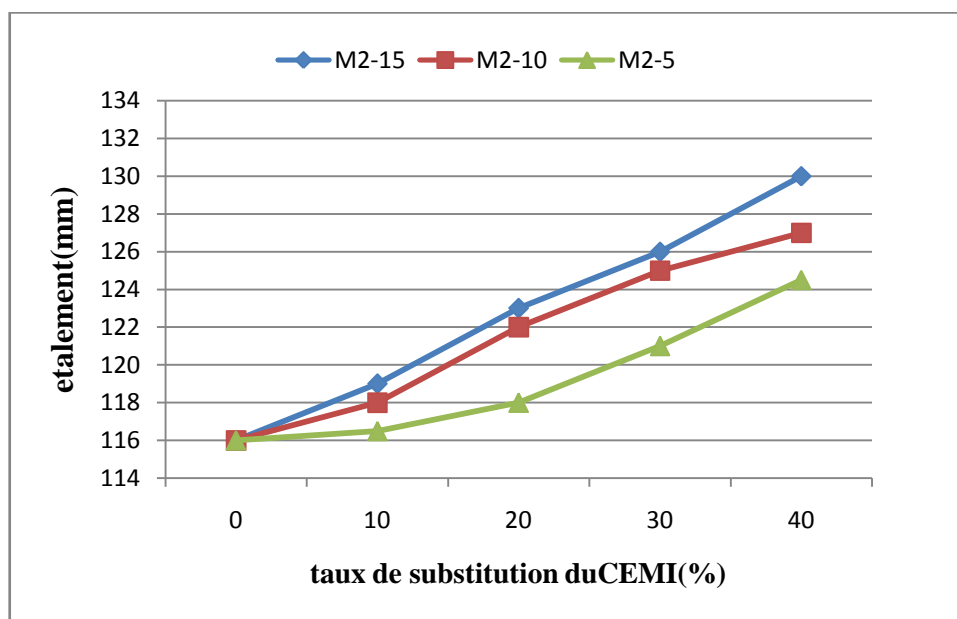
**Tableau IV.3** *Etalement des mortiers à base de ciment C2 avec additions calcaires (E/L constant):*

Mortier	E/L	Type de ciment	Taux de substitution en fillers calcaires(%)			Etalement (mm)
			L15(%)	L10(%)	L5(%)	
M2-0	0.5	C2	0	0	0	116
M2-15	0.5	C2	10	0	0	119
M2-15	0.5	C2	20	0	0	123
M2-15	0.5	C2	30	0	0	126
M2-15	0.5	C2	40	0	0	130
M2-10	0.5	C2	0	10	0	118
M2-10	0.5	C2	0	20	0	122
M2-10	0.5	C2	0	30	0	125
M2-10	0.5	C2	0	40	0	127
M2-5	0.5	C2	0	0	10	116,5
M2-5	0.5	C2	0	0	20	118
M2-5	0.5	C2	0	0	30	121
M2-5	0.5	C2	0	0	40	124,5

Les figures **IV.2** et **IV.3** présentent la variation de l'étalement sur la table à secousse des mortiers C1 et C2 avec fines calcaires, en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition.



**Figure IV.2** Variation de l'étalement des mortiers C1 en fonction du taux de substitution du ciment par les fillers calcaires à  $E/L=0,5$



**Figure IV.3** Variation de l'étalement des mortiers à base de ciment C2 en fonction du taux de substitution du ciment par les fillers calcaires à  $E/L=0,5$

Nous rappelons que l'étalement du mortier de référence M1-0 est égal à 120 mm alors que celui du mortier de référence M2-0 est égal à 116mm.

La figure IV.2 montre que cet étalement croit avec l'ajout des fillers calcaires de différentes finesses, et il est d'autant plus grand que la quantité de fines calcaires dans le mélange est importante et que la finesse des additions calcaires est réduite.

En effet, les mélanges des mortiers avec fines calcaires L15 présentent les maniabilités les plus importantes et l'étalement croit avec l'augmentation de la quantité de fines L15 dans le mélange pour passer de 123 mm à 10% de fillers à 131 mm à 40% de fillers. Les mélanges des mortiers avec fines calcaires L5 présentent les maniabilités les plus faibles mais restent toujours supérieures à celle du mortier de référence M1-0 qui passent de 121 mm à 10% de fillers à 125 mm à 40% de fillers. Les mortiers M1-L10 présentent des maniabilités intermédiaires.

Le comportement des mortiers M2 avec fillers calcaires est similaire à celui des mortiers M1 avec fillers calcaires, mais l'augmentation de la maniabilité en fonction du taux d'ajout est plus importante par rapport à celle remarquée pour les mortiers M1-L. Ceci peut être expliqué par la diminution de la finesse globale des mélanges M2 par les fillers L15 et L10 qui ont une finesse plus faible par rapport à celle du ciment utilisé C2.

Ces résultats montrent que la fluidité des mortiers M1 et M2 est très influencée par l'ajout des fillers calcaires. Dans ce cas, elle est d'autant plus grande que la quantité de fillers est importante et que la finesse des fillers est réduite, comme rapporté par **Chahinez A [36]**. Ceci peut être expliqué par le fait qu'à une finesse inférieure à celle du ciment, les grains du filler ajoutés au mélange comblent les vides entre les grains de ciment ce qui permet la libération de l'eau piégé dans ces vides. Cet eau libéré devient un améliorant de la maniabilité. Néanmoins, pour les additions calcaires de finesse supérieure par rapport à celle du ciment, un effet contraire peut être observé **Gallias [20]**, car les additions n'ont pas le même effet tel que ceci a été observé. Dans ce cas, les grains de l'addition plus fins comblent les vides et libère l'eau piégé mais absorbent en même temps une partie de cet eau libéré ce qui rend plus faible l'amélioration de la maniabilité ou dans le cas d'additions ultrafines engendrent des pertes de maniabilité **Boudchicha A et al [21]**.

L'analyse de ces résultats obtenue par rapport à l'influence des fines calcaires étudiées sur la fluidité des mortiers, est que l'étalement est d'autant plus grand que la finesse est réduite et que le taux de substitution du ciment par l'addition est important.

#### **IV.2.2 Effet des fillers calcaires sur les résistances à la compression des mortiers à E/L constant**

Après avoir évalué l'étalement des mortiers, les gâchées seront moulés dans des moules de (5\*5\*5) cm<sup>3</sup> conformément à la méthodologie indiquée dans le chapitre III pour avoir 15 éprouvettes cubiques prêtes aux écrasements à 1, 2, 3, 7 et 28 jours. La résistance  $f_{cj}$  représente la moyenne des résultats d'écrasement de trois éprouvettes.

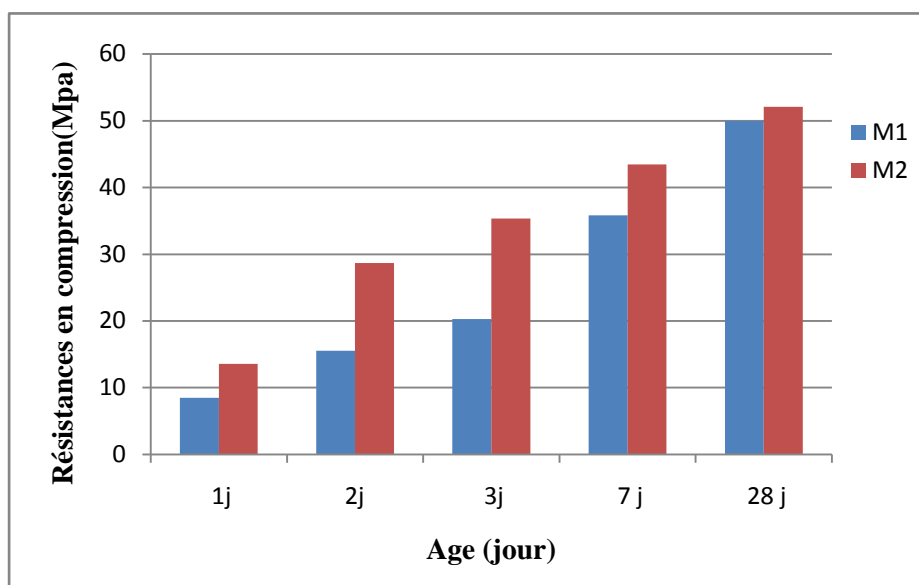
#### IV.2.2.1 Mortiers de références :

Les résistances mesurées sur les éprouvettes des mortiers témoins à base de ciment C1 et C2 sans additions sont présentés dans le **tableau IV.4**.

**Tableau IV.4** Résistances à la compression des mortiers de références M1-0 et M2-0:

Mortier	E/C	Type de ciment	Résistances en compression(Mpa)				
			fc <sub>1</sub>	fc <sub>2</sub>	fc <sub>3</sub>	fc <sub>7</sub>	fc <sub>28</sub>
M1-0	0.5	C1	8,51	15,53	20,29	35,83	50,00
M2-0	0.5	C2	13,57	28,68	35,37	43,43	52,08

La figure IV.4 présente l'évolution des résistances à la compression des mortiers à base du ciment C1 et C2 sans additions.



**Figure IV.4** Evolution des résistances en compression des mortiers à base des ciments C1 et C2 sans additions à E/L=0,5

Cette figure montre que le mortier de référence M2-0 développe des résistances en compression plus importantes que celles du mortier de référence M1-0 à toutes les échéances.

- A un jour le mortier M2-0 atteint une résistance en compression de 13.57 MPa et est supérieure à celle du mortier M1-0 de 158%.
- A 2 et 3 jours les résistances du mortier M2-0 atteignent 28.67 MPa et 35.37 MPa, respectivement et représentent 180%, des résistances du mortier M1-0.

- A 7 jours la résistance du mortier M2-0 atteint 43.43 Mpa, et représente 121%, de la résistance du mortier M1-0.
- A 28 jours les résistances en compression des deux mortiers sont presque égales, avec une légère amélioration pour le mortier M2-0.

On remarque donc que les deux mortiers de référence ont un comportement différent à 1, 2 et 3 jours, mais la différence de résistances commence à s'atténuer à partir de 07 jours pour converger à partir de 28 jours. Ceci peut être expliqué par les paramètres suivants :

- La surface spécifique : Le ciment C2, du mortier M2-0, a une surface spécifique plus importante ( $4150 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) que celle du ciment C1 du mortier M1-0 ( $3810 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Une finesse plus importante développe des surfaces libres en contact avec l'eau plus importante favorisant une hydratation initiale plus rapide pour le mortier M2-0.
- Le taux de C<sub>3</sub>S : le taux du C<sub>3</sub>S du ciment C2, qui est égal à 73.27%, et supérieur à celui du ciment C1, qui est égal à 55.50%. Ce taux élevé du C<sub>3</sub>S donne au ciment une résistance rapide et élevée à courts termes car cette phase est responsable des résistances aux premiers âges.
- La classe du ciment : le mortier M2 est confectionné à partir d'un ciment CEM I 42,5 R tel que R indique une classe du ciment à durcissement rapide par contre le ciment CEM II 42,5 est un ciment de classe normale. La classe R (**Tableau III.5**) est un paramètre qui est utilisé par les cimentiers pour montrer que ce ciment peut développer des résistances rapides à courts termes et qu'il est préconisé pour la préfabrication et le béton précontraint. Cette caractéristique peut être obtenue par une homogénéisation adaptée pour atteindre un taux de C3S important ou un broyage fin pour obtenir des surfaces spécifiques importantes.

#### **IV.2.2.2 Mortiers à base de ciment C1 et fillers calcaires:**

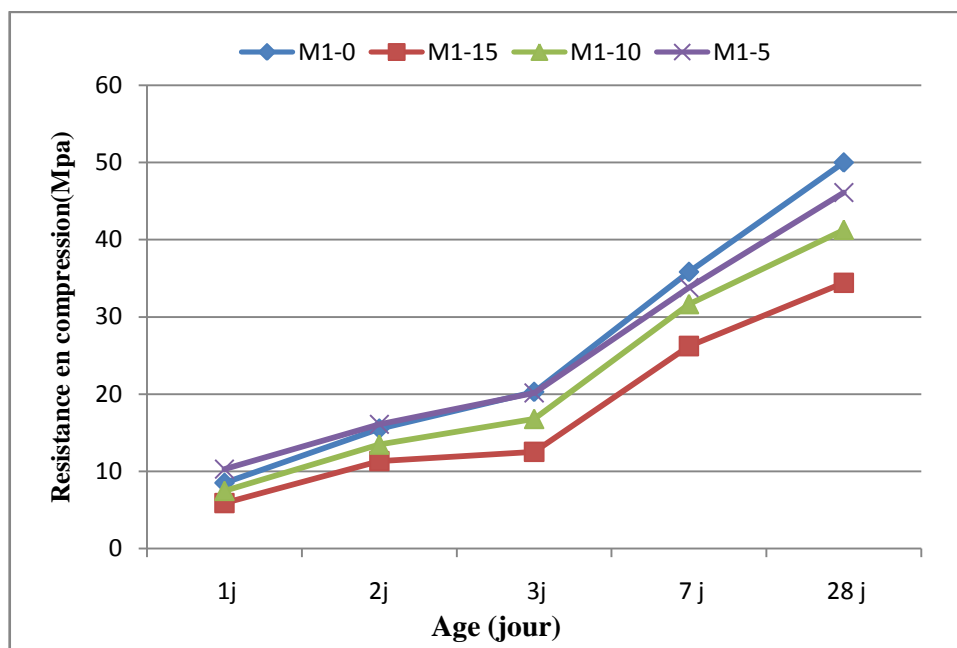
Les résistances en compression mesurées sur des éprouvettes de mortiers à base de ciment C1 avec les additions L15, L10, L5 à taux de substitutions de 10%,20%,30% et 40% sont présentés dans le **tableau IV.5**.

**Tableau IV.5** Résistances en compression des mortiers M1 avec additions calcaires:

Mortier	E/L	Taux de substitution en fillers calcaires(%)			Résistances à la compression (MPa)				
		L15	L10	L5	fc <sub>1</sub>	fc <sub>2</sub>	fc <sub>3</sub>	fc <sub>7</sub>	fc <sub>28</sub>
M1-0	0.5	0	0	0	8,51	15,53	20,29	35,83	50
M1-15	0.5	10	0	0	5,91	11,34	12,53	26,22	34,4
M1-15	0.5	20	0	0	4,8	9,68	11,55	20,31	26,4
M1-15	0.5	30	0	0	3,75	6,1	6,5	14,48	21,3
M1-15	0.5	40	0	0	2,5	3,5	4,68	13,1	16,38
M1-10	0.5	0	10	0	7,46	13,46	16,78	31,65	41,28
M1-10	0.5	0	20	0	5,26	10,14	13,62	23,23	30,02
M1-10	0.5	0	30	0	4,23	7,64	8,75	17,83	26,11
M1-10	0.5	0	40	0	3,28	4,51	6,52	15,38	18,59
M1-5	0.5	0	0	10	10,3	16,1	20,15	33,79	46,1
M1-5	0.5	0	0	20	7,58	12,88	16,89	26,95	36,46
M1-5	0.5	0	0	30	5,76	8,9	10,88	19,04	29,61
M1-5	0.5	0	0	40	4,8	6,15	7,46	18,21	22,74

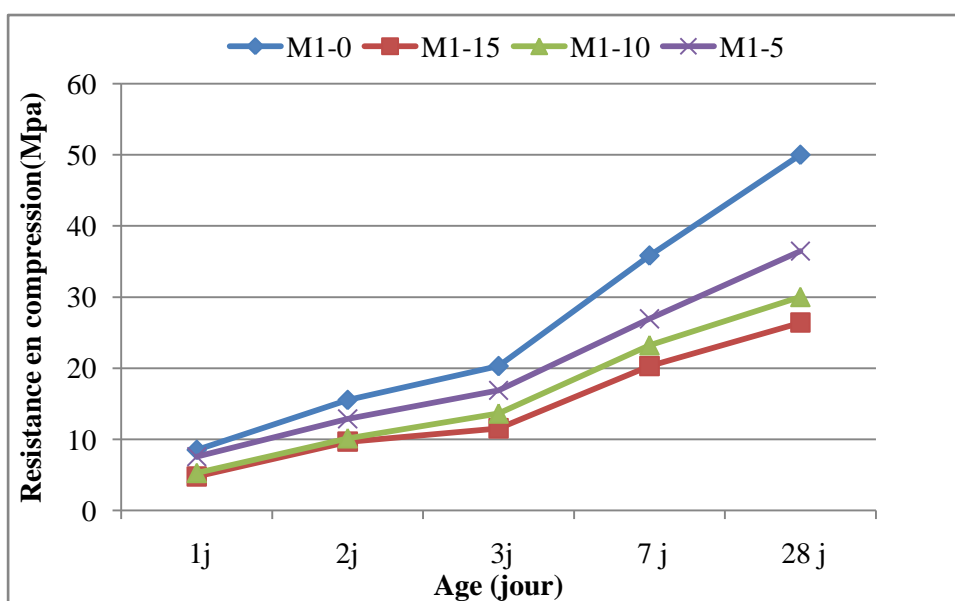
Les figures **IV.5**, **IV.6**, **IV.7** et **IV.8** présentent l'évolution de la résistance des mortiers M1 à base de ciment C1, avec les trois additions calcaires L5, L10 et L15 à différents taux de substitution du ciment par l'addition calcaire, par rapport au mortier témoin pour un rapport E/L=0,5.

La figure IV.5 montre que, pour un taux de substitution de 10% de la masse du ciment C1 par l'addition calcaire, le mortier M1-5 donne des résistances aux premiers jours supérieures à celles du mortier témoin jusqu'à 03 jours de l'âge du mortier. Les mortiers M1-10 et M1-15 donnent des résistances inférieures à celles du mortier de référence M1-0 à toutes les échéances, avec un meilleur comportement du mortier M1-10. Le mortier M1-5 donne un gain de résistance mécanique de 21 % à 01 jour et 04 % à 2 jours, et une résistance équivalent à celle du mortier témoin à 03 jours. A partir de cette échéance, les résistances mécaniques du mortier M5 deviennent inférieures à celles du mortier témoin de 6 à 8 % en moyenne sans trop affecter les résistances à 7 et 28 jours.



**Figure IV.5** Evolution des résistances en compression des mortiers M1 avec les trois additions calcaires à 10% du taux de substitution du ciment C1 ( $E/L=0,5$ )

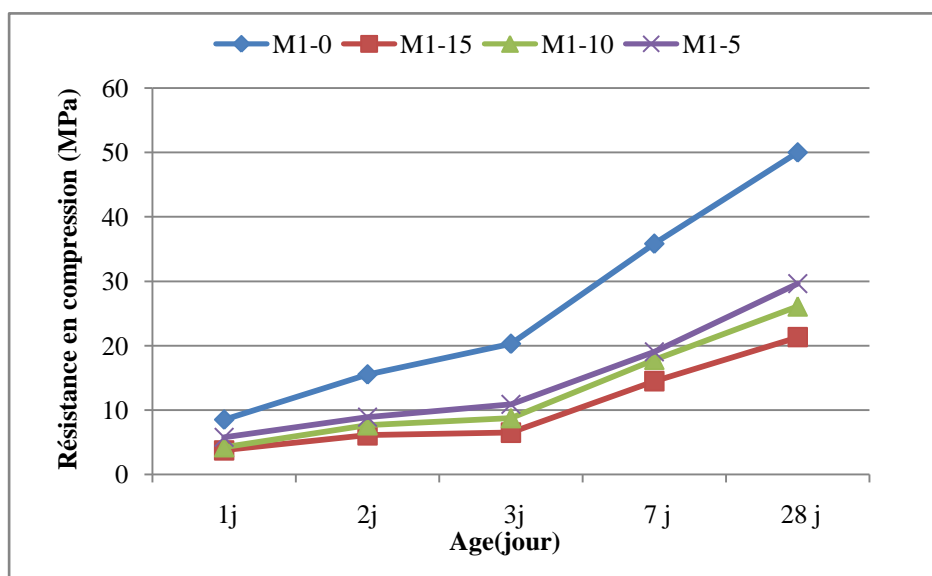
Ce comportement peut être expliqué par une accélération du processus d'hydratation du ciment avec 10% d'addition calcaires L5 de finesse supérieure à celle du ciment.



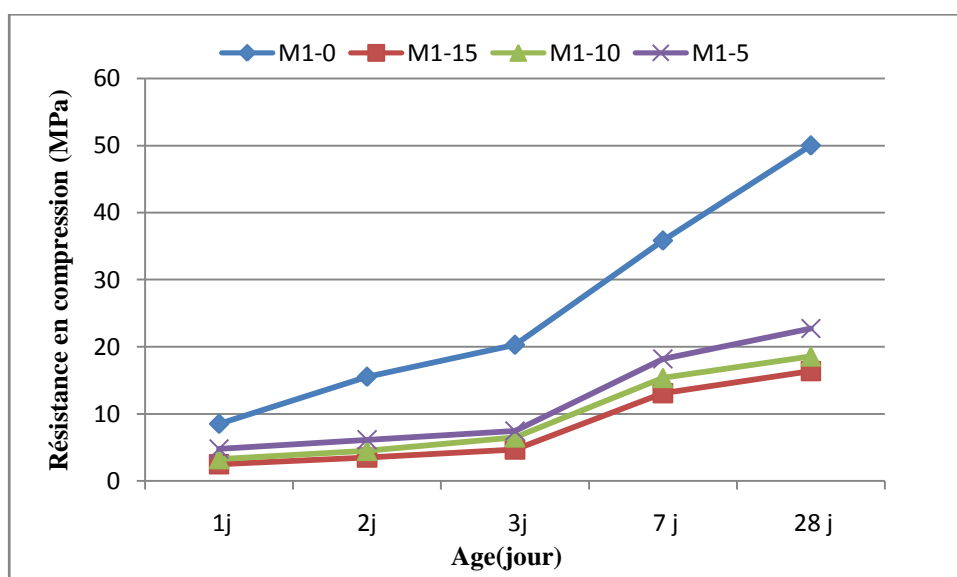
**Figure IV.6** Evolution des résistances en compression des mortiers M1 avec les trois additions calcaires à 20% du taux de substitution du ciment C1 ( $E/L=0,5$ )

La Figure IV.6 montre que, pour un taux de substitution de 20% de la masse du ciment C1 par l'addition calcaire, le mortier avec fillers L5 donne des résistances en compression à 01 jour qui atteint 89% de la résistance du mortier de référence M1-0, mais l'écart s'amplifie à partir de 02 jours jusqu'à

atteindre une perte de résistance de 27% à 28 jours. Les mortiers M1-10 et M1-15 donnent des résistances inférieures à celles du mortier de référence M1-0 à toutes les échéances, avec un meilleur comportement du mortier M1-10.



**Figure IV.7** Evolution des résistances en compression des mortiers M1 avec les trois additions calcaires à 30% du taux de substitution du ciment C1 ( $E/L=0,5$ )

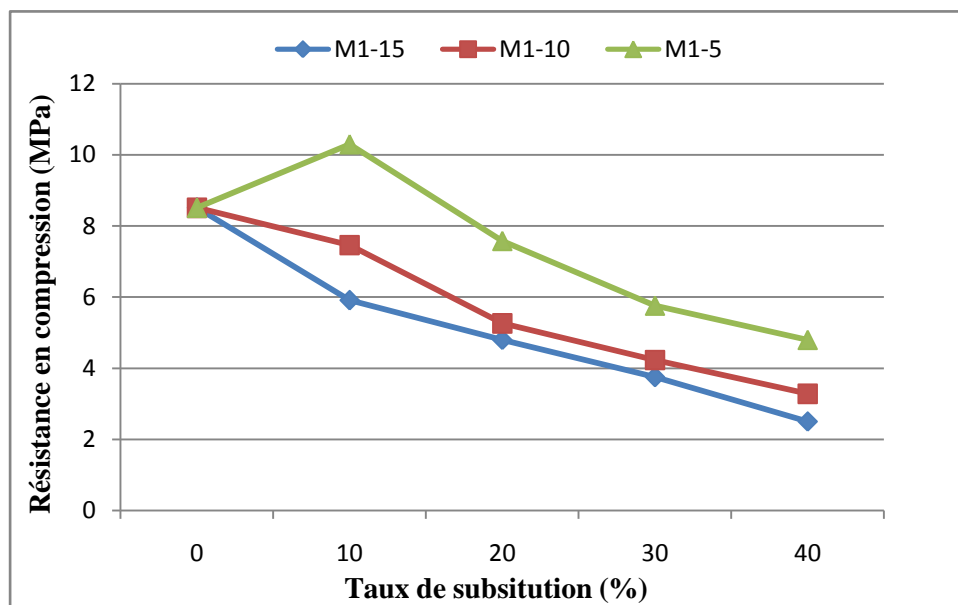


**Figure IV.8** Evolution des résistances en compression des mortiers M1 avec les trois additions calcaires à 40% du taux de substitution du ciment C1 ( $E/L=0,5$ )

Il apparait dans les figures IV.7 et IV.8 qu'aucune amélioration des résistances n'est enregistrée par les 03 additions calcaires pour des taux de substitutions de 30% et 40 %. Nous pouvons constater une chute impressionnante des résistances à partir de 02 jours qui ne dépassent pas à 03 jours 10 MPa dans les meilleurs des cas et qui atteint une perte de résistance à 28 jours de 41% par rapport au mortier de référence, dans les meilleurs des cas.

Ces résultats confirment le comportement global des mortiers avec additions calcaires qui peuvent générer un comportement mécanique acceptable à faible taux de substitution tels que relaté par la bibliographie **Toufik Boubekour et al [42]**. Néanmoins, nous remarquons qu'à courts termes les additions calcaires L5 peuvent donner à 10% du taux de substitution du ciment des résultats satisfaisants jusqu'à 03 jours d'âge des mortiers M1 avec le ciment C1, sans altérer les résistances à 28 jours.

Les figures **IV.9**, **IV.10**, **IV.11**, **IV.12** et **IV.13** illustrent la variation des résistances en compression des mortiers M1 confectionnés à base du ciment C1 en fonction du taux de substitution du ciment C1 par des fillers calcaires L5, L10 et L15, aux différents âges.



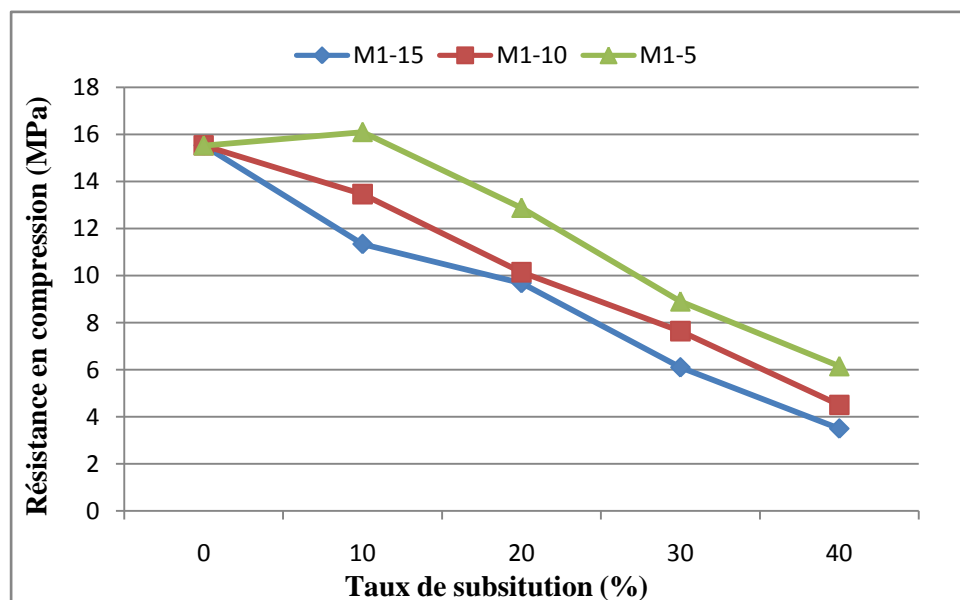
**Figure IV.9** *Variation de la résistance en compression à 1 jour des mortiers M1 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à  $E/L=0,5$*

La figure **IV.9** montre qu'à 01 jour d'âge, le mortier avec fillers L5 donne un gain important de la résistance en compression à 10% du taux de substitution du ciment qui atteint 21% par rapport au mortier de référence M1-0. Avec l'augmentation de la quantité de fillers L5 dans le mortier, le gain de résistance se réduit et 89% de la résistance du mortier témoin à 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis chute jusqu'à afficher une perte de résistance de 44% par rapport au mortier témoin. Les mortiers avec fillers L10 et L15 donnent des résultats inférieurs aux résistances du mortier de référence M1-0 à 01 jour d'âge qui passe de 88% pour le mortier avec fillers L10 et 69% pour le mortier avec fillers L15 à 10% du taux de substitution à 39% et 29%, respectivement de la résistance du mortier de référence à 40% du taux de substitution.

Il ressort donc que l'utilisation des fillers L5 est bénéfique pour l'amélioration des résistances en compression à 01 jour d'âge des mortiers avec ciment C1, jusqu'à 10% du taux de substitution du ciment à E/L constant. L'ajout des fillers L10 et L15 au mortier M1 engendrent des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.

La figure IV.10 montre qu'à 02 jours d'âge, le mortier avec fillers L5 affiche une amélioration de résistance moins importante qu'à 01 jour, qui atteint 04% par rapport au mortier de référence M1-0, à 10 % du taux de substitution du ciment. Cette résistance commence à chuter à partir 20% du taux de substitution du ciment et les résistances passent de 83% à 20% du taux de substitution à 40% de la résistance du mortier M1-0 à 40% du taux de substitution. Les mortiers avec fillers L10 et L15 donnent des résultats inférieurs aux résistances du mortier de référence à 02 jours d'âge qui passent de 87% pour le mortier avec fillers L10 et 73% pour le mortier avec fillers L15 à 10% du taux de substitution à 29% et 23%, respectivement de la résistance du mortier de référence M1-0 à 40% du taux de substitution.

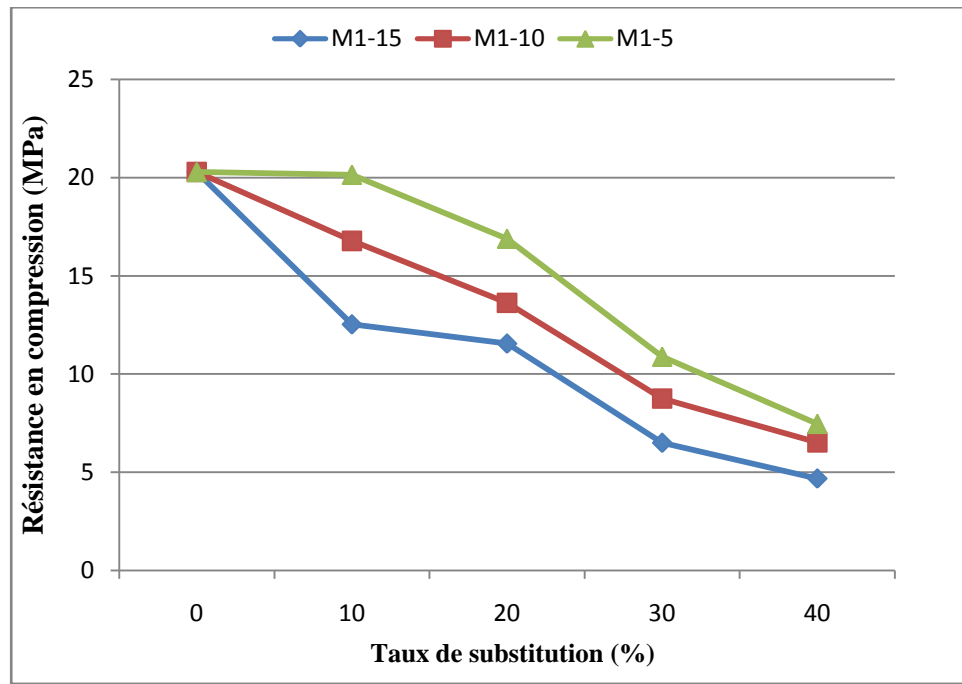
Il ressort donc que l'utilisation des fillers L5 est bénéfique pour l'amélioration des résistances en compression à 02 jours d'âge des mortiers avec ciment C1, jusqu'à 10% du taux de substitution du ciment à E/C constant. L'ajout des fillers L10 et L15 au mortier M1 engendrent des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.



**Figure IV.10** *Variation de la résistance en compression des mortiers M1 à 2 jours en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à E/L=0,5*

La figure IV.11 montre qu'à 03 jours d'âge, Les fillers L5 n'apportent aucune amélioration de résistance et ne peuvent que maintenir la résistance à 10% du taux de substitution du ciment. Au-delà

de cette quantité, l'ajout de fillers L5 engendre une chute des résistances qui passent de 83% de celle du mortier de référence M1-0 à 20% du taux de substitution jusqu'à 37% à 40% du taux de substitution du ciment.



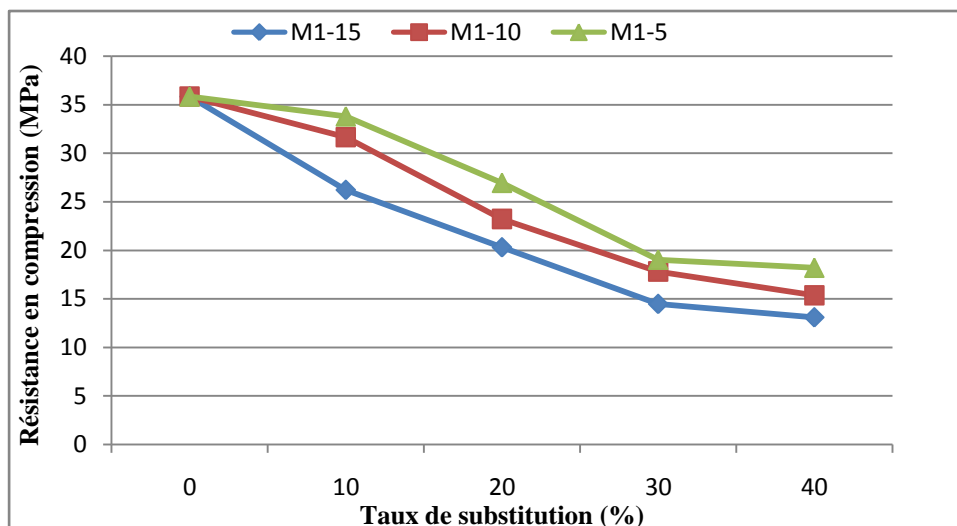
**Figure IV.11** Variation de la résistance en compression des mortiers M1 à 3 jours en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à E/L=0,5

Les mortiers avec fillers L10 et L15 donnent des résultats inférieurs aux résistances du mortier de référence à 03 jours d'âge qui passent de 83% pour le mortier avec fillers L10 et 62% pour le mortier avec fillers L15 à 10% du taux de substitution à 32% et 23%, respectivement de la résistance du mortier de référence M1-0 à 40% du taux de substitution.

Il ressort donc que l'utilisation des fillers L5 peut être bénéfique pour les résistances en compression à 03 jours d'âge des mortiers avec ciment C1, jusqu'à 10% du taux de substitution du ciment à E/C constant. L'ajout des fillers L10 et L15 au mortier M1 engendrent des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.

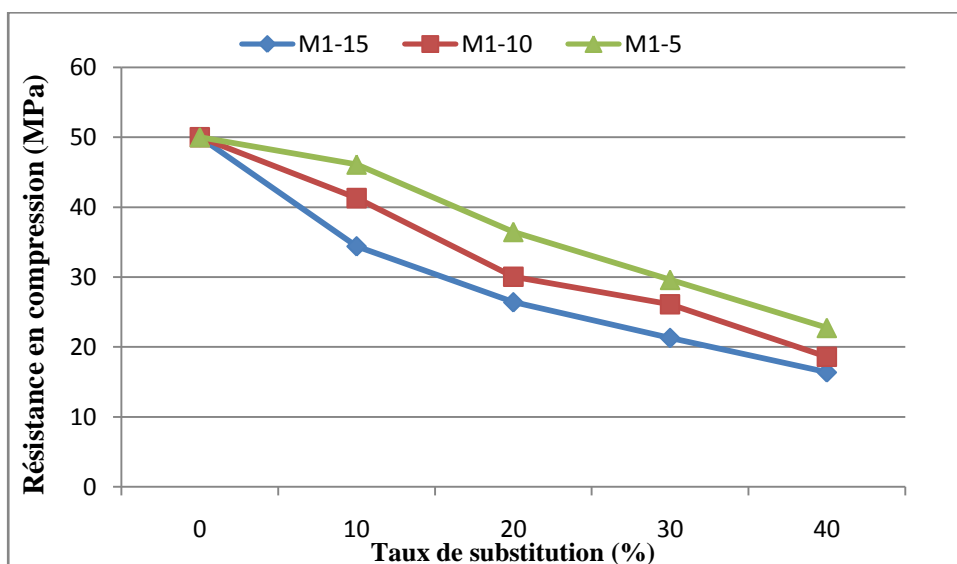
A 07 jours, la figure IV.12 montre que l'ajout des fillers calcaires n'apporte aucune amélioration de résistances pour les mortiers M1 avec le ciment C1 à E/C constant. Les mortiers M1 avec fillers L5 affichent le meilleur comportement puisque la perte de résistance ne dépasse pas 6% à 10% du taux de substitution du ciment. Les mortiers avec fillers L10 et L5 présentent un comportement globalement à 07 jours, meilleur aux échéances antérieures sans apporter un intérêt particulier.

Il ressort donc que l'utilisation des fillers calcaires dans les mortiers M1 n'apporte pas d'amélioration de résistances à 07 jours à E/C constant



**Figure IV.12** Variation de la résistance en compression des mortiers M1 à 7 jours en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à  $E/L=0,5$

A 28 jours, la figure **IV.13** montre que l'ajout des fillers calcaires n'apporte aucune amélioration de résistances pour les mortiers M1 avec le ciment C1 à E/C constant. Les mortiers M1 avec fillers L5 affichent le meilleur comportement puisque la perte de résistance ne dépasse pas 8% à 10% du taux de substitution du ciment. La perte de résistance s'amplifie avec l'augmentation de la quantité de fillers L5 jusqu'à atteindre 55% du mortier de référence M1-0. Les mortiers avec fillers L10 et L5 présentent des chutes de résistances globalement équivalentes à celles des autres échéances.



**Figure IV.13** Variation de la résistance en compression des mortiers M1 à 28 jours en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à  $E/L=0,5$

Il ressort donc que l'utilisation des fillers calcaires dans les mortiers M1 n'apporte pas d'amélioration de résistances à 28 jours à E/C constant. Néanmoins, l'utilisation de 10% de fillers L5 permet de préserver 92% de la résistance en compression du mortier de référence M1-0

Il ressort des figures **IV.9**, **IV.10**, **IV.11**, **IV.12** et **IV.13**, que l'ajout des fillers calcaires aux mortiers M1 avec ciment C1 à E/C constant, peut être bénéfique pour les résistances en compression à très court terme (01 et 02 jours) dans le cas des fillers L5 de finesse supérieure à celle du ciment, sans pour autant que les résistances à 28 jours ne soient altérées. Cet apport peut être expliqué par l'accélération du processus d'hydratation du ciment aux jeunes âges comme ceci a été confirmé par plusieurs auteurs auparavant **Benzet [45]** et **Nonat [44]**.

#### **IV.2.2.3 Mortiers à base de ciment C2 et fillers calcaires**

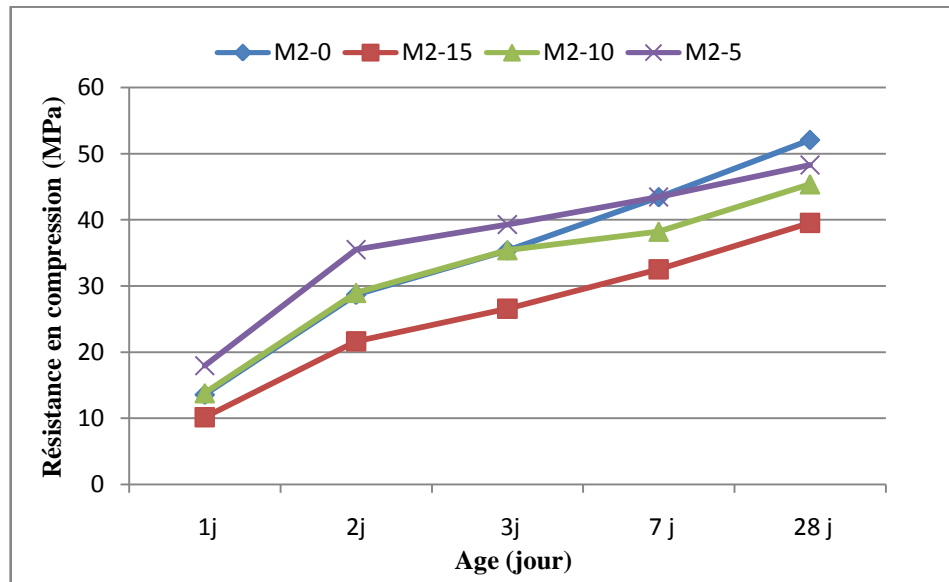
Les résistances en compression mesurées sur des éprouvettes de mortiers à base de ciment C2 avec les additions L15, L10, L5 à taux de substitutions de 10%, 20%, 30% et 40% sont présentés dans le **tableau IV.6**

**Tableau IV.6** Résistances à la compression des mortiers M2 avec additions calcaires

Mortier	E/L	Taux de substitution en fillers calcaires(%)			Résistances à la compression (Mpa)				
		L15	L10	L5	fc <sub>1</sub>	fc <sub>2</sub>	fc <sub>3</sub>	fc <sub>7</sub>	fc <sub>28</sub>
<b>M2-0</b>	0.5	0	0	0	13,57	28,68	35,37	43,43	52,08
<b>M2-15</b>	0.5	10	0	0	10,15	21,61	26,55	32,53	39,54
<b>M2-15</b>	0.5	20	0	0	8,6	18,23	24,02	27,97	34,36
<b>M2-15</b>	0.5	30	0	0	7,39	14,16	20,91	23,06	31,13
<b>M2-15</b>	0.5	40	0	0	5,41	10,97	13,93	17,09	20,71
<b>M2-10</b>	0.5	0	10	0	13,81	28,97	35,43	38,23	45,39
<b>M2-10</b>	0.5	0	20	0	9,83	24,88	31,02	32,07	41,73
<b>M2-10</b>	0.5	0	30	0	7,93	19,29	22,8	25,98	35,69
<b>M2-10</b>	0.5	0	40	0	6,1	14,8	18,9	21,52	26,62
<b>M2-5</b>	0.5	0	0	10	17,94	35,5	39,3	43,47	48,3
<b>M2-5</b>	0.5	0	0	20	13,04	26,63	31,75	34,98	43,45
<b>M2-5</b>	0.5	0	0	30	11,98	22,05	25,07	31,18	38,24
<b>M2-5</b>	0.5	0	0	40	9,33	18,24	21,5	25,11	29,12

Les figures **IV.14**, **IV.15**, **IV.16** et **IV.17** présentent l'évolution de la résistance des mortiers M2 à base de ciment C2, avec les trois additions calcaires L5, L10 et L15 à différents taux de substitution en masse du ciment par l'addition calcaire, par rapport au mortier témoin pour un rapport E/L=0,5.

La figure IV.14 montre que, pour un taux de substitution de 10% de la masse du ciment C2 par l'addition calcaire, le mortier M2-5 donne des résistances aux premiers jours supérieures à celles du mortier témoin jusqu'à 07 jours de l'âge du mortier. Le mortier M2-10 donne des résistances aux premiers jours équivalentes à celles du mortier témoin jusqu'à 03 jours de l'âge du mortier. Le mortier M2-15 donne des résistances inférieures à celles du mortier de référence M2-0 à toutes les échéances.

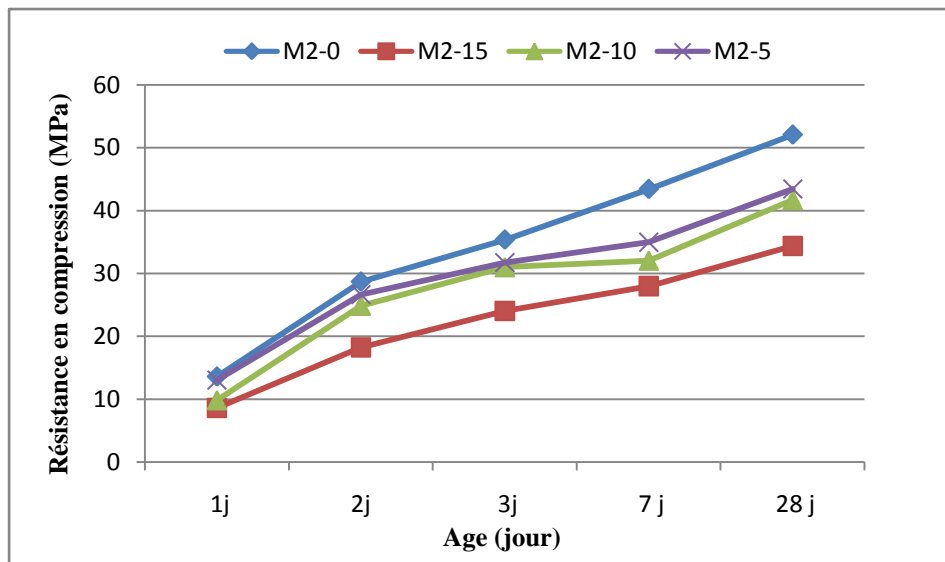


**Figure IV.14** Evolution des résistances en compression des mortiers M2 avec les trois additions calcaires à 10% du taux de substitution du ciment C2 ( $E/L=0,5$ )

Le mortier M2-5 donne un gain de résistance mécanique de 32 % à 01 jour, 24 % à 02 jours, 11% à 03 jours et une résistance égale à celle du mortier témoin à 07 jours. A partir de cette échéance, les résistances mécaniques du mortier M2-5 deviennent inférieures à celles du mortier témoin de 7 % sans trop affecter la résistance à 28 jours.

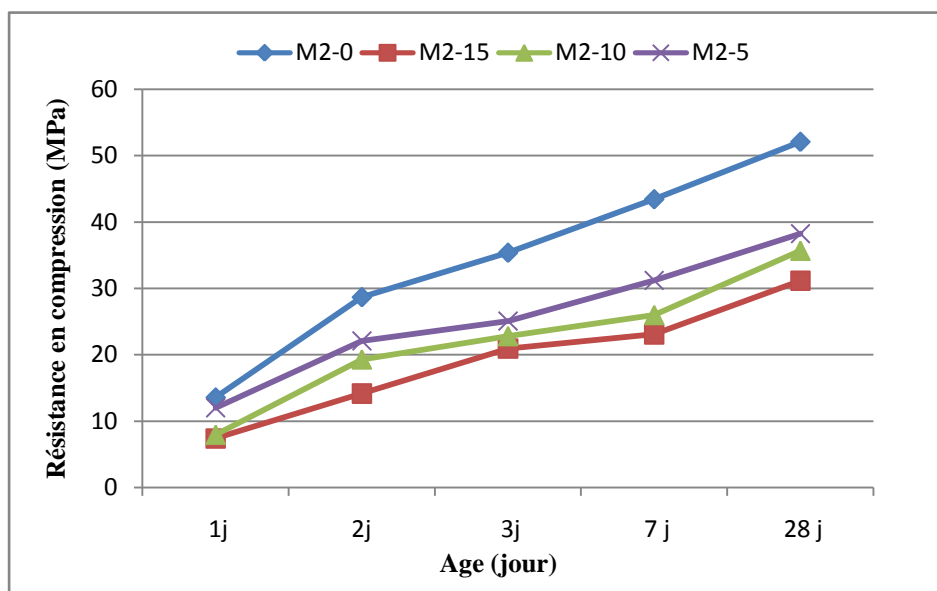
Ce comportement peut être expliqué par une accélération du processus d'hydratation du ciment avec 10% d'addition calcaires L5 de finesse supérieure à celle du ciment. Nous remarquons que le comportement global est meilleur que celui des mortiers M1 avec additions.

La Figure IV.15 montre que, pour un taux de substitution de 20% de la masse du ciment C2 par les additions calcaires, le mortier avec fillers L5 donne des résistances en compression à 1 et 2 jours équivalentes à celles données par le mortier témoin M2-0 avec des pertes de résistances qui ne dépassent pas 07%, mais l'écart s'amplifie à partir de 03 jours jusqu'à atteindre une perte de résistance de 17% à 28 jours. Les mortiers M2-10 et M2-15 donnent des résistances inférieures à celles du mortier de référence M2-0 à toutes les échéances, avec un meilleur comportement du mortier M2-10.

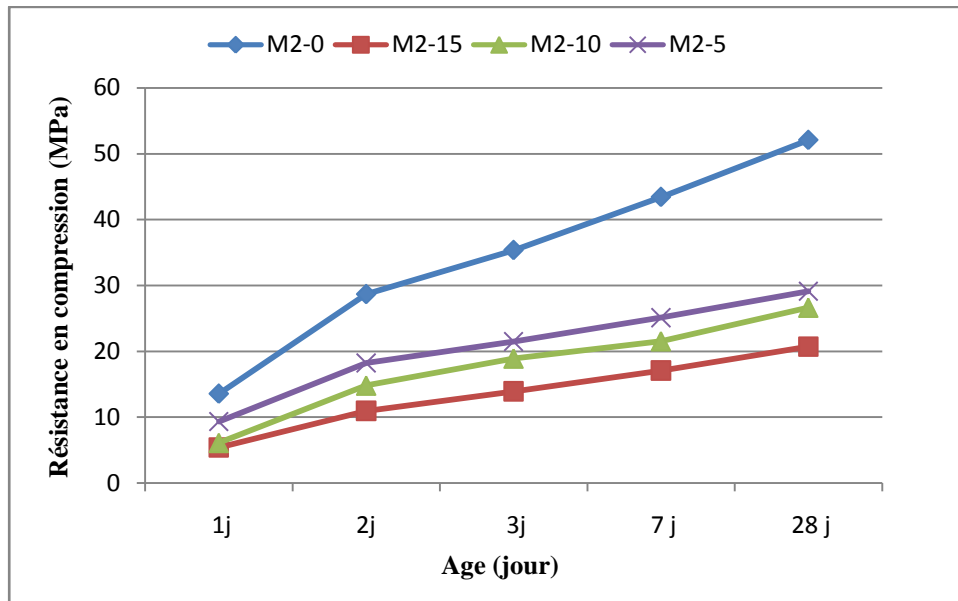


**Figure IV.15** Evolution des résistances en compression des mortiers M2 avec les trois additions calcaires à 20% du taux de substitution du ciment C2 ( $E/L=0,5$ )

Il apparaît dans les figures IV.16 et IV.17 qu'aucune amélioration des résistances n'est enregistrée par les 03 additions calcaires pour des taux de substitution du ciment C2 de 30% et 40 %. Nous pouvons constater que l'écart de résistance par rapport au mortier de référence s'amplifie à partir de 02 jours jusqu'à atteindre une perte de résistance de 44% à 40% du taux de substitution dans le meilleur des cas pour les mortiers M2 avec fillers L5.



**Figure IV.16** Evolution des résistances en compression des mortiers M2 avec les trois additions calcaires à 30% du taux de substitution du ciment C2 ( $E/L=0,5$ )

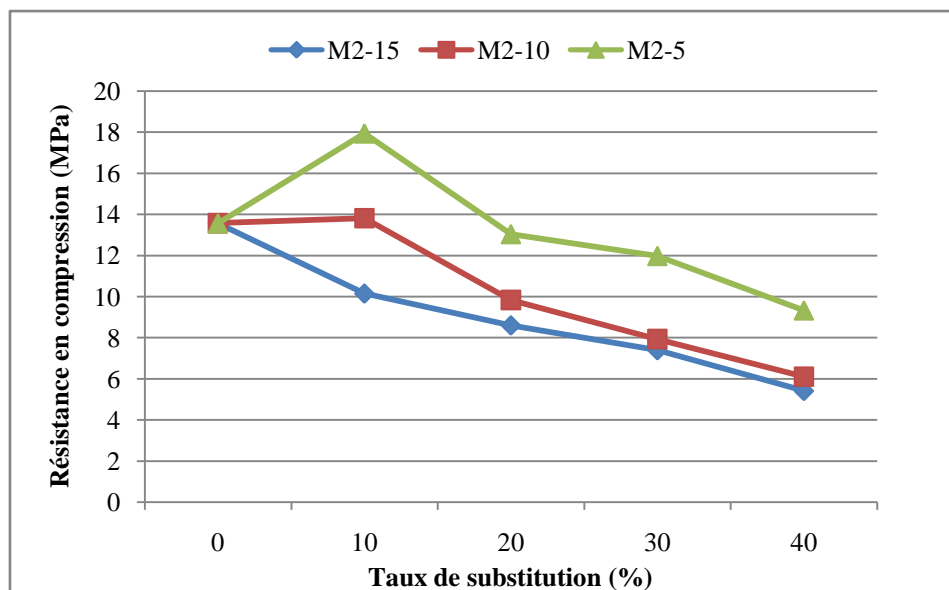


**Figure IV.17** Evolution des résistances en compression des mortiers M2 avec les trois additions calcaires à 40% du taux de substitution du ciment C2 ( $E/L=0,5$ )

Ces résultats confirment le comportement global des mortiers avec additions calcaires qui peuvent générer un comportement mécanique acceptable à faible taux de substitution tels que relaté par la bibliographie **Toufik Boubekour et al [42]**. Néanmoins, nous remarquons qu'à courts termes les additions calcaires L5 peuvent donner à 10% du taux de substitution du ciment des résultats satisfaisants jusqu'à 07 jours d'âge des mortiers M2 avec le ciment C2, sans altérer les résistances à 28 jours.

Les figures **IV.18**, **IV.19**, **IV.20**, **IV.21** et **IV.22** illustrent la variation des résistances en compression des mortiers M2 confectionnés à base du ciment C2 à divers échéances en fonction du taux de substitution en masse du ciment C2 par des fillers calcaires L5, L10 et L15, à un rapport  $E/C=0,5$ .

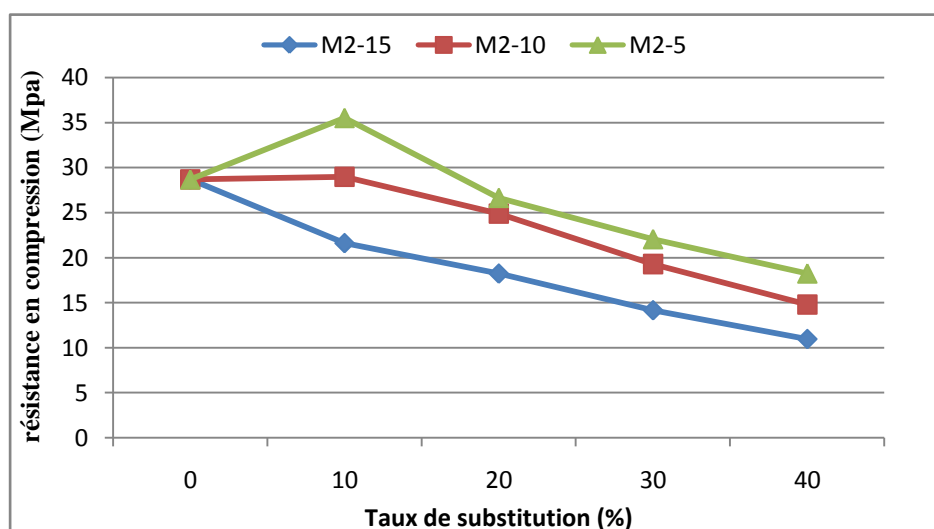
La figure **IV.18** montre qu'à 01 jour d'âge, le mortier avec fillers L5 donne un gain important de la résistance en compression à 10% du taux de substitution du ciment qui atteint 132% par rapport au mortier de référence M2-0. Avec l'augmentation de la quantité de fillers L5 dans le mortier, le gain de résistance se réduit et devient équivalent à la résistance du mortier témoin à 20 % du taux de substitution du ciment par l'addition, puis chute jusqu'à afficher une perte de résistance de 31% par rapport au mortier témoin à 40% du taux de substitution du ciment. Les mortiers avec fillers L10 donnent de résistances équivalentes au mortier de référence à 10% du taux de substitution puis chutent pour des quantités plus importantes de fillers. Les mortiers M2 avec fillers L15 donnent des résultats inférieurs aux résistances du mortier de référence M2-0 à 01 jour d'âge pour tous les taux de substitution du ciment.



**Figure IV.18** Variation de la résistance en compression à 1 jour des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à  $E/L=0,5$

Il ressort donc que l'utilisation des fillers L5 et L10 est bénéfique pour l'amélioration des résistances en compression à 01 jour d'âge des mortiers avec ciment C2, jusqu'à 20% et 10% du taux de substitution du ciment respectivement à E/C constant. L'utilisation de quantités plus importante engendre des chutes de résistances. L'ajout des fillers L15 au mortier M1 engendrent des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.

A 02 jours d'âge (figure IV.19), le comportement des mortiers avec fillers calcaires est globalement similaire à leur comportement à 01 jour. L'amélioration des résistances engendrée par les fillers L5 à 10% du taux de substitution peut atteindre 24%.

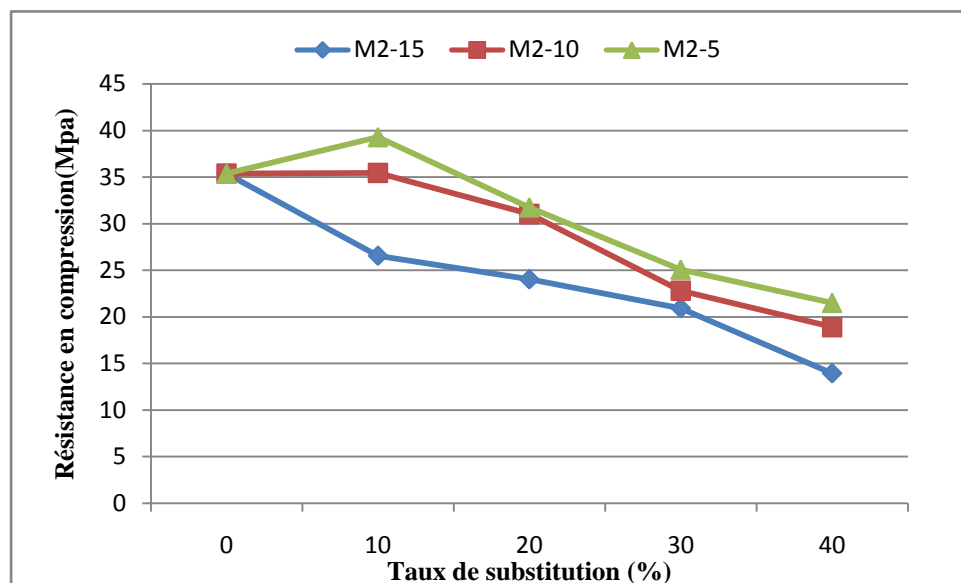


**Figure IV.19** Variation de la résistance en compression à 2 jours des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à  $E/L=0,5$

Il ressort donc que l'utilisation des fillers L5 est bénéfique pour l'amélioration des résistances en compression à 02 jours d'âge des mortiers avec ciment C2, jusqu'à 10% du taux de substitution du ciment à E/C constant. L'ajout des fillers L10 et L15 au mortier M1 engendrent des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.

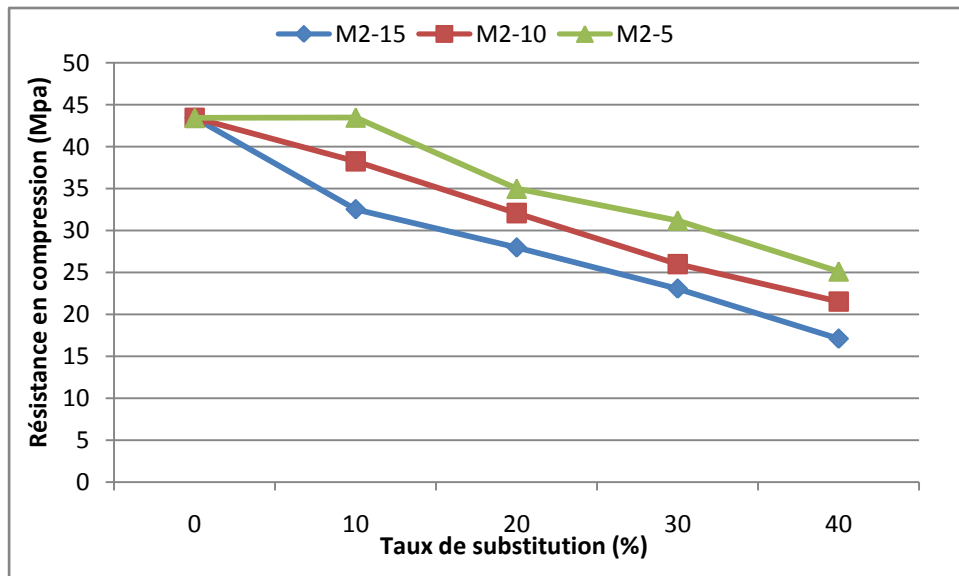
La figure IV.20 montre qu'à 03 jours d'âge, Les fillers L5 permettent d'améliorer les résistances de 11% par rapport au mortier de référence M2-0 à 10% du taux de substitution du ciment et les fillers L10 permettent de les maintenir. Ce comportement est différent par rapport à celui des mortiers M1 avec fillers calcaires. Pour des quantités plus importantes et pour le cas des fillers L15, l'ajout des additions engendre des chutes de résistances à 03 jours pour E/C constant.

Il ressort donc que l'utilisation des fillers L5 et L10 peut être bénéfique pour les résistances en compression à 03 jours d'âge des mortiers avec ciment C2, jusqu'à 10% du taux de substitution du ciment à E/C constant. L'ajout des fillers L15 au mortier M2 engendre des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.



**Figure IV.20** Variation de la résistance en compression à 3 jours des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à E/L=0,5

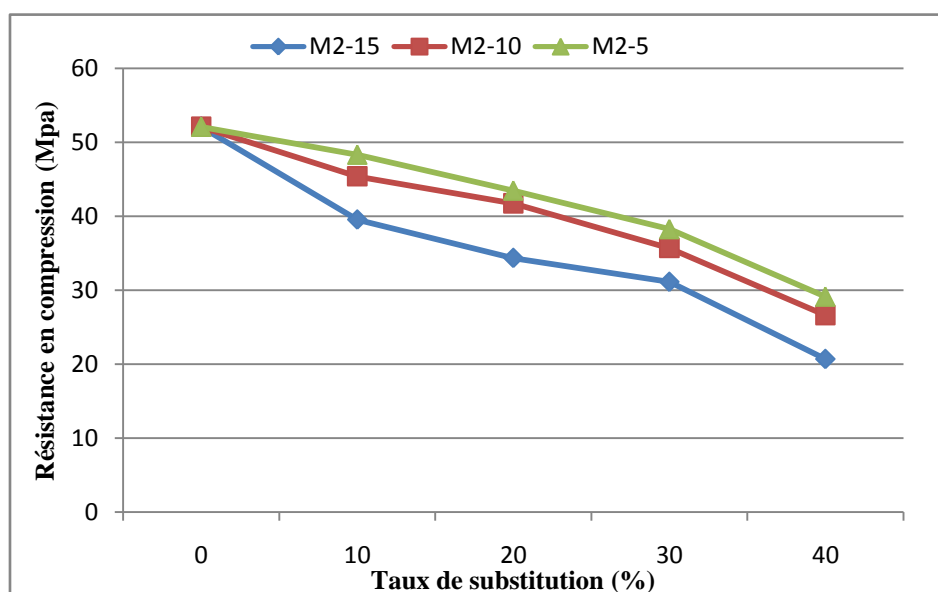
La figure IV.21 montre qu'à 07 jours d'âge, Les fillers L5 permettent de maintenir les résistances par rapport au mortier de référence M2-0 à 10% du taux de substitution du ciment. Pour des quantités plus importantes et pour le cas des fillers L10 et L15, l'ajout des additions engendre des chutes de résistances à 07 jours pour E/L constant.



**Figure IV.21** Variation de la résistance en compression à 7 jours des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à  $E/L=0,5$

A 28 jours, la figure **IV.22** montre que l'ajout des fillers calcaires n'apporte aucune amélioration de résistances pour les mortiers M2 avec le ciment C2 à E/C constant. Les mortiers M2 avec fillers L5 affichent le meilleur comportement puisque la perte de résistance ne dépasse pas 7% à 10% du taux de substitution du ciment. La perte de résistance s'amplifie avec l'augmentation de la quantité de fillers L5 jusqu'à atteindre 44% du mortier de référence M2-0. Les mortiers avec fillers L10 et L5 présentent des chutes de résistances globalement équivalentes à celles des autres échéances.

Il ressort donc que l'utilisation des fillers calcaires dans les mortiers M2 n'apporte pas d'amélioration de résistances à 28 jours à E/C constant. Néanmoins, l'utilisation de 10% de fillers L5 permet de préserver 93% de la résistance en compression du mortier de référence M2-0.



**Figure IV.22 Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers M2 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à E/L=0,5**

Il ressort des figures **IV.18**, **IV.19**, **IV.20**, **IV.21** et **IV.22**, que l'ajout de 10% de fillers calcaires aux mortiers M2 avec ciment C2 à E/C constant, peut être bénéfique pour les résistances en compression à jeunes âges (01 à 07 jours) dans le cas des fillers L5 de finesse supérieure à celle du ciment, sans pour autant que les résistances à 28 jours ne soient altérées. Cet apport peut être expliqué par l'accélération du processus d'hydratation du ciment aux jeunes âges lié à une probable activité chimique des additions calcaires de finesse assez importante, comme ceci a été confirmé par plusieurs auteurs auparavant.

Les résultats obtenus dans la première phase d'étude à E/C constant, ont montré que le comportement global des fillers calcaires avec le ciment C2 (CEM I 42.5 R) était meilleur qu'avec le ciment C1 (CEM II 42.5/A). Ce comportement est essentiellement dû à la plus grande finesse du ciment C2 ainsi qu'à sa qualité de durcissement rapide. Pour l'intérêt du sujet développé, il serait donc plus judicieux de poursuivre la deuxième phase de l'étude en utilisant le ciment C2 (CEM I 42.5 R) qui présente de meilleures caractéristiques à courts termes et dont on pourrait prévoir de meilleures applications et de meilleures performances avec les fillers calcaires.

**IV.3 Effet des additions calcaires sur les propriétés des mortiers à maniabilité constante :**

Nous avons remarqué dans le paragraphe précédent que l'ajout de fillers calcaires L5, L10 et L15 en substitution massive du ciment à E/L constant a engendré une augmentation de la maniabilité du mélange cimentaire à l'état frais. Cette augmentation de la fluidité des mélanges était d'autant plus importante que la quantité d'addition est importante et que la finesse des particules est réduite. Par conséquent l'ajout de forts taux de fillers calcaires L15 avait l'effet granulaire le plus favorable et permettait d'avoir la plus grande fluidité dans les mélanges avec additions calcaires utilisés.

D'autre part, nous avons constaté aussi que l'utilisation des additions calcaires L5 de plus grande finesse à des taux de substitution du ciment réduits (10%), permettait d'avoir des améliorations des résistances à courts termes sans beaucoup altérer la résistance à 28 jours. Cette amélioration était imputée à un effet chimique favorable.

Il serait donc judicieux, de penser que la combinaison des deux effets granulaires et chimique permettrait d'améliorer les performances à courts termes et maintenir les résistances à 28 jours par rapport au mortier de référence ainsi que d'élargir le champ d'application des fillers et des taux de substitution du ciment.

Comme cela a été expliqué auparavant, on se limitera dans cette partie de l'étude à l'utilisation du ciment C2 (CEM I 42.5 R) de caractéristiques plus adaptées aux besoins de cette étude.

M3-0 : le mortier de référence confectionné à base du ciment C2 à maniabilité constante

M3-L : les mortiers confectionnés à base du ciment C2 avec additions calcaires à maniabilité constante.

Tel que L indique le type (Diamètre moyen) de filler calcaire substitué au ciment (L=0, L=5, L=10 et L=15).

#### **IV. 3.1 Effet des fillers calcaires sur le besoin en eau des mortiers M3 à maniabilité constante:**

Le besoin en eau des mortiers avec additions calcaires peut être analysé en évaluant le rapport E/C des mortiers à maniabilité constante, en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires étudiées L5, L10, et L15. Dans ce cas C désigne la quantité de liant y compris ciment et fillers.

La maniabilité de référence a été choisie égale à 116 mm, correspondant à un rapport E/L égal à 0.5.

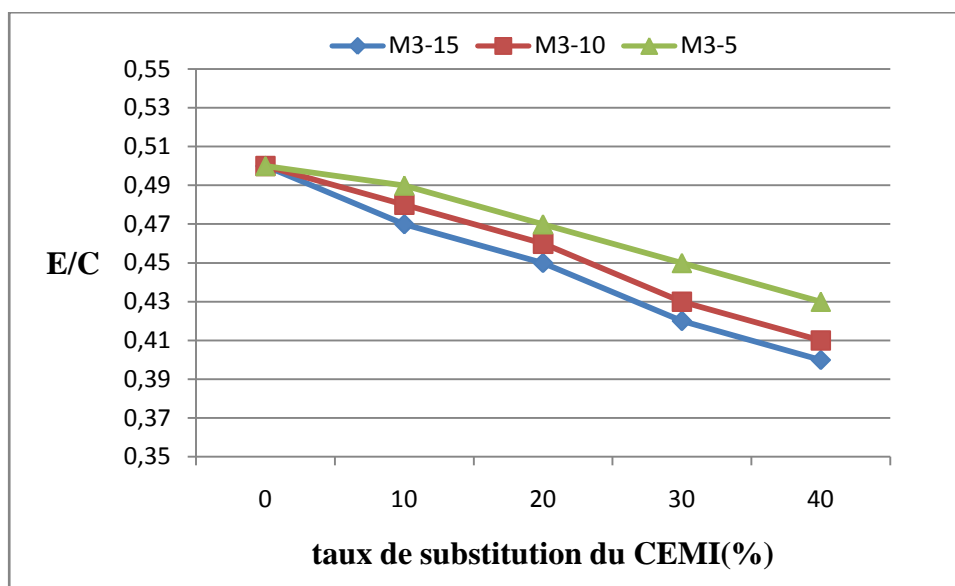
Les mesures des rapports E/L pour les mortiers M3 avec additions calcaires L5, L10 et L15 à maniabilité constante pour des taux de substitution de 10%, 20%, 30% et 40% sont regroupés dans le tableau IV.7 .

**Tableau IV.7** Besoin en eau à maniabilité constante des mortiers M3:

Mortier	Consistance (mm)	Taux de substitution en fillers calcaires(%)			E/L
		L15(%)	L10(%)	L5(%)	
<b>M3-0</b>	116	0	0	0	<b>0,50</b>
<b>M3-15</b>	116	10	0	0	<b>0,47</b>
<b>M3-15</b>	116	20	0	0	<b>0,45</b>
<b>M3-15</b>	116	30	0	0	<b>0,42</b>
<b>M3-15</b>	116	40	0	0	<b>0,4</b>
<b>M3-10</b>	116	0	10	0	<b>0,48</b>
<b>M3-10</b>	116	0	20	0	<b>0,46</b>
<b>M3-10</b>	116	0	30	0	<b>0,43</b>
<b>M3-10</b>	116	0	40	0	<b>0,41</b>
<b>M3-5</b>	116	0	0	10	<b>0,49</b>
<b>M3-5</b>	116	0	0	20	<b>0,47</b>
<b>M3-5</b>	116	0	0	30	<b>0,45</b>
<b>M3-5</b>	116	0	0	40	<b>0,43</b>

Nous remarquons que toutes les valeurs du rapport E/L obtenus sont inférieures à celle du mortier témoin ( $E/L = 0,5$ ). Ceci démontre l'effet granulaire favorable des fillers calcaires étudiés.

La figure **IV.23** représente la variation du besoin en eau des mortiers M3 à maniabilité constante en fonction de différents taux de substitutions en masse du ciment par les additions calcaires L5, L10 et L15



**Figure IV.23** Variation du besoin en eau des mortiers à base de ciment C2 avec fillers calcaires à maniabilité constante

La figure **IV.23** montre que le besoin en eau des mortiers avec filler calcaire L5 est important par rapport à celui des mortiers avec fillers L10 et L15. Les mortiers avec filler L15 présente les besoins en eau les plus faibles. Ce besoin en eau décroît avec l'augmentation du taux de substitution du ciment par l'addition. Donc le besoin en eau des mortiers avec fillers calcaires est d'autant plus faible de la finesse est réduite et que la quantité d'addition dans le mélange est importante.

Le besoin en eau le plus important présenté pour les mortiers avec fillers calcaires L5 peut être expliqué par la surface spécifique importante de ce filler par rapport à celles des autres additions et par rapport à celle du ciment.

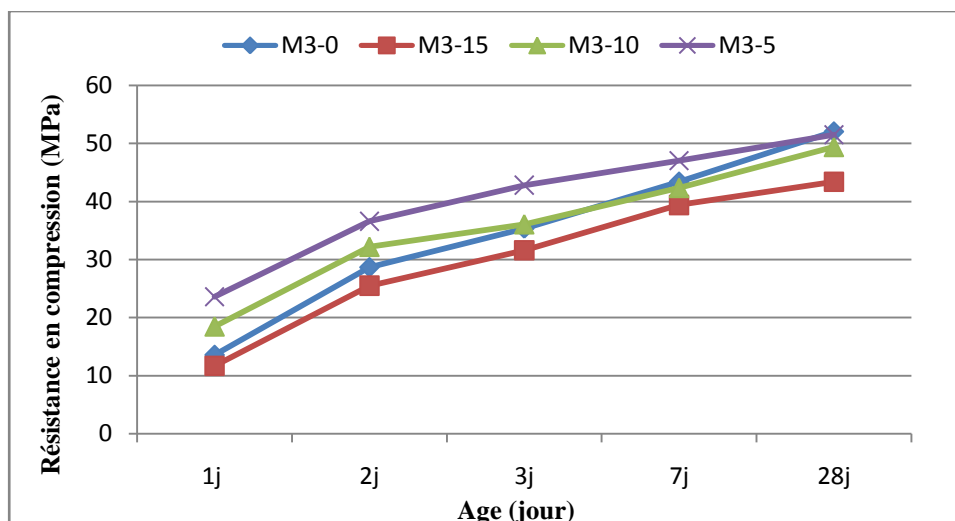
#### **IV. 3.2 Effet des fillers calcaires sur les résistances en compression des mortiers à base de ciment C2 à maniabilité constante:**

Le tableau IV.8 fournit les résultats de la variation des résistances en compression pour les mortiers M3 à maniabilité constante en fonction du type et du taux de substitution du ciment C2 par les fillers calcaires L5, L10 et L15.

**Tableau IV.8** variation des résistances à la compression des mortiers M3 avec additions calcaires à maniabilité constante:

Mortier	E/L	Taux de substitution en fillers calcaires(%)			Résistances à la compression (MPa)				
		L15	L10	L5	fc <sub>1</sub>	fc <sub>2</sub>	fc <sub>3</sub>	fc <sub>7</sub>	fc <sub>28</sub>
M3-0	0,50	0	0	0	13,57	28,68	35,37	43,43	52,08
M3-15	0,47	10	0	0	11,69	25,5	31,59	39,4	43,39
M3-15	0,45	20	0	0	10,51	21,76	26,35	32,12	40,26
M3-15	0,42	30	0	0	8,33	16,12	22,04	27,93	35,52
M3-15	0,4	40	0	0	5,95	13,81	19,68	25,15	30,48
M3-10	0,48	0	10	0	18,5	32,21	36,09	42,35	49,4
M3-10	0,46	0	20	0	16,13	27,54	31,19	38,08	45,77
M3-10	0,43	0	30	0	14,02	23,78	28,3	32,3	42,24
M3-10	0,41	0	40	0	11,51	20,25	23,54	27,74	32,53
M3-5	0,49	0	0	10	23,62	36,6	42,82	47,03	51,5
M3-5	0,47	0	0	20	20,22	29,313	36,57	42,75	49,68
M3-5	0,45	0	0	30	16,89	26,66	33,08	39,4	46,97
M3-5	0,43	0	0	40	13,65	22,63	27,21	31,32	39,76

Les figures IV.24, IV.25, IV.26 et IV.27 présentent l'évolution de la résistance des mortiers M3, avec fillers calcaires L5, L10 et L15 à différents taux de substitution en masse du ciment par l'addition à maniabilité constante.

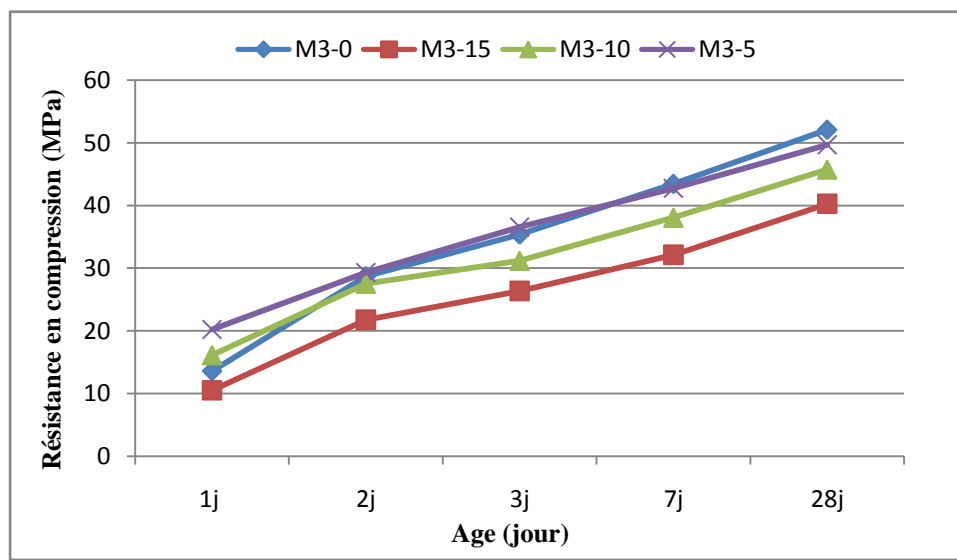


**Figure IV.24** Evolution de la résistance en compression des mortiers M3 avec 10 % de fillers calcaires à maniabilité constante

La figure IV.24 montre que, pour un taux de substitution de 10% de la masse du ciment C2 par l'addition calcaire, le mortier M3-5 présente le meilleur comportement et donne des résistances à jeunes âges supérieures à celles du mortier témoin jusqu'à 07 jours de l'âge du mortier, à maniabilité constante. Le mortier M3-10 donne aussi des résistances en compression supérieures à celle du mortier de référence jusqu'à 03 jours d'âge. En effet les gains de résistance apportés par les fillers L5 sont de l'ordre de 74%, 28% 21% et 08% à 01, 02, 03 et 07 jours d'âge respectivement. La résistance à 28 jours étant maintenue. Les gains de résistance apportés par les fillers L10 sont de l'ordre de 36%, 12% et 02% à 01, 02 et 03 jours d'âge respectivement. La résistance à 28 jours étant maintenue à 95% de la résistance du mortier de référence M3-0. Les mortiers M3-15 donnent des résistances inférieures à celles du mortier de référence M3-0 à toutes les échéances.

Ce comportement peut être expliqué par la combinaison d'un effet chimique approprié à l'addition calcaire L5 avec un effet granulaire favorable. L'addition L10 présentant un effet chimique plus atténué a pu apporter un apport de résistance grâce à un effet granulaire plus favorable. L'effet granulaire favorable des additions L15 n'a pas pu compenser la faiblesse de l'effet chimique de cette addition de finesse réduite. Ceci conforte les analyse effectuées au paragraphe précédent et confortent plusieurs études dans le même domaine, ce qui peut mettre en relief l'apport des fines calcaires dans l'amélioration des résistances à jeunes âges.

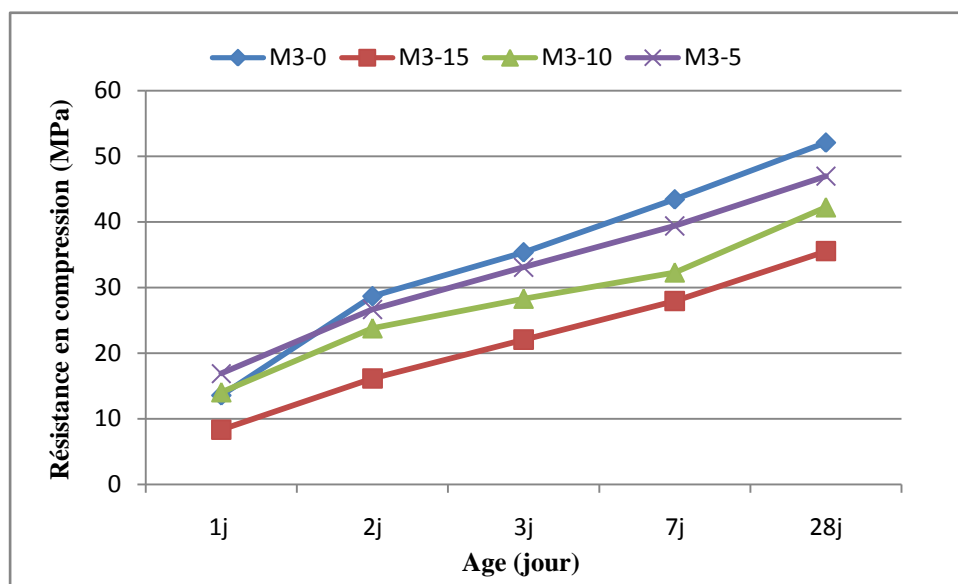
La Figure IV.25 montre que, pour un taux de substitution de 20% de la masse du ciment C2 par l'addition calcaire, le mortier avec fillers L5 présente un bon comportement et donne des résistances en compression à 01 jour qui atteint 49% de la résistance du mortier de référence M3-0, en maintenant les résistances aux autres échéances aux niveaux des résistances du mortier de référence M3-0. Le mortier avec fillers L10 affiche toujours une amélioration de la résistance à 01 jour de 19% et la maintient à 02 jours, et les résistances aux autres échéances se situent à près de 90% des résistances du mortier de référence m. Les mortiers M1-15 donnent des résistances inférieures à celles du mortier de référence M1-0 à toutes les échéances.



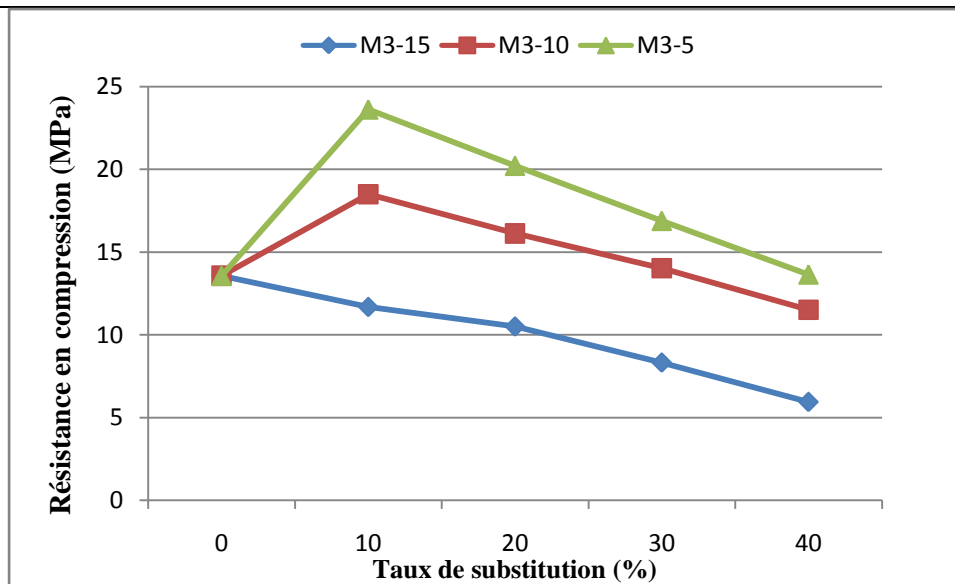
**Figure IV.25** *Evolution de la résistance en compression des mortiers M3 avec 20 % de fillers calcaires à maniabilité constante*

Il en ressort donc que les apports physiques et chimiques des additions calcaires L5 et L10 utilisées à 20% du taux de substitution du ciment permettent d'apporter une amélioration des résistances à courts termes avec le maintien à des niveaux acceptables des résistances à 28 jours.

Il apparait dans les figures IV.26 et IV.27 que l'ajout de 30% et 40% de fillers calcaires n'apporte pas globalement d'amélioration aux résistances en compression des mortiers. En effet, les résistances des mortiers M3 avec additions L5, L10 et L15 sont toutes inférieurs aux résistances du mortier de référence M3-0 à l'exception de la résistance à 01 jour des mortiers avec fillers L5 et L10 qui affichent des améliorations de 24% et 03% respectivement à 30% du taux de substitution du ciment. Néanmoins, il est tout de même intéressant de noter que le mortier M3 avec fillers L5 maintient ses résistances aux autres échéances à plus de 90% de la résistance du mortier de référence.



**Figure IV.26** *Variation de la résistance en compression des mortiers M3 avec 30 % de fillers calcaires à maniabilité constante*

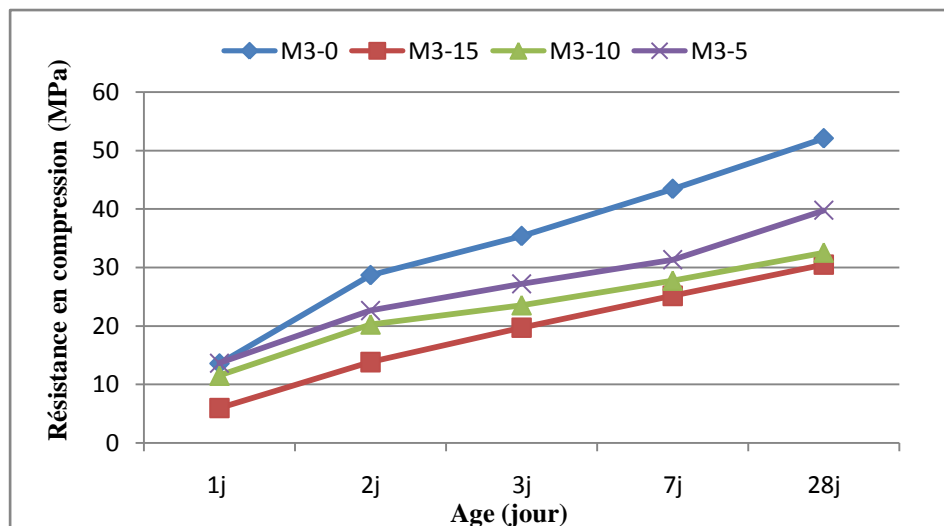


**Figure IV.27** *Variation de la résistance en compression des mortiers M3 avec 40 % de fillers calcaires à maniabilité constante*

Ces résultats confirment les résultats obtenus précédemment pour les mélanges à E/L constant. Néanmoins, nous remarquons qu'à maniabilité constante et en faisant intervenir l'effet granulaire favorable des fillers calcaires étudiés L5 et L10, nous avons obtenus des résultats intéressants quant à l'amélioration des résistances à courts termes tout en maintenant les résistances à 28 jours à des niveaux appréciables.

A fin de mieux analyser le comportement des mortiers avec additions aux différentes échéances et spécialement à courts termes nous représentons sur les figures **IV.28**, **IV.29**, **IV.30**, **IV.31** et **IV.32** la variation des résistances en compression à 01, 02, 03, 07 et 28 jours des mortiers M3 confectionnés à base du ciment C2 en fonction du taux de substitution en masse du ciment C2 par des fillers calcaires L5, L10 et L15, à maniabilité constante.

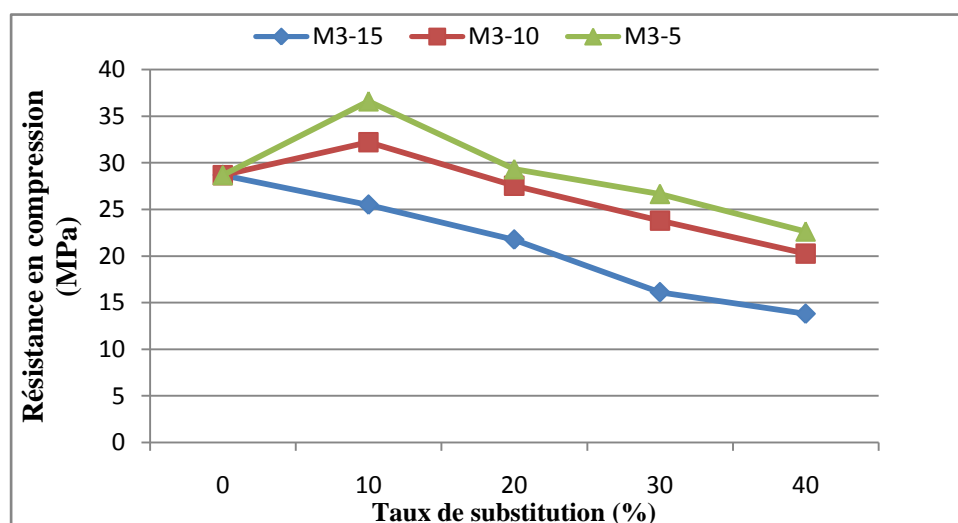
La figure **IV.28** montre qu'à 01 jour d'âge, les mortiers avec fillers L5 présentent un comportement très appréciable à consistance égale, puisque toutes les résistances à 01 jour pour les différents taux de substitution sont supérieures aux résistances du mortier de référence. Le gain relatif de résistance atteint 74%, 49%, 24% et 01% à 10%, 20%, 30% et 40% respectivement, du taux de substitution du ciment. Les mortiers avec fillers L10 présentent un comportement aussi intéressant puisque les résistances à 01 jour restent supérieures aux résistances du mortier de référence jusqu'à 30% du taux de substitution du ciment. Le gain relatif de résistance atteint 36%, 19%, et 03% à 10%, 20% et 30% du taux de substitution du ciment. Les résistances des mortiers avec fillers L15 plus grossier sont inférieures à celles du mortier de référence pour tous les taux de substitution.



**Figure IV.28** Variation de la résistance en compression à 1 jour des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante

Il ressort donc que l'utilisation des fillers L5 et L10 est bénéfique pour l'amélioration des résistances en compression à 01 jour d'âge des mortiers avec ciment C2, jusqu'à 30% du taux de substitution du ciment consistance égale. L'ajout des fillers L15 au mortier M3 à base de ciment C2 engendre des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.

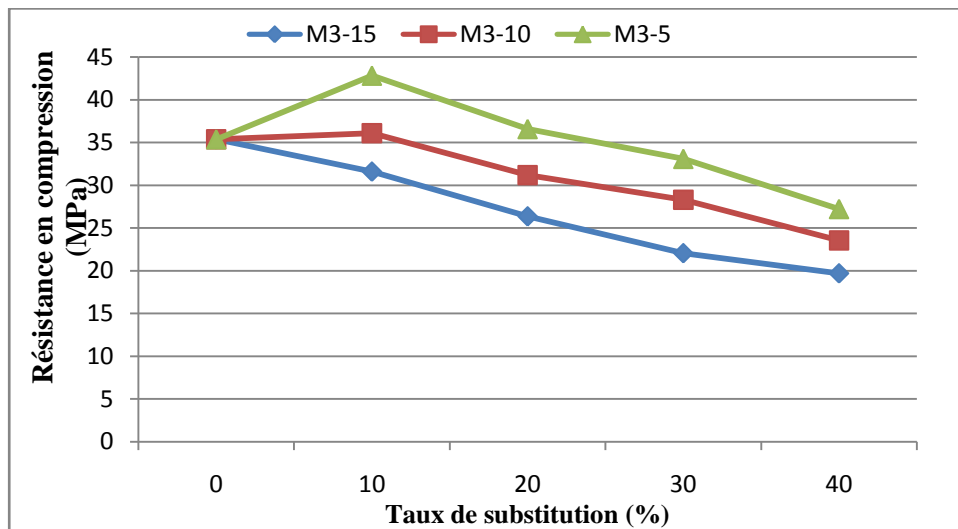
La figure IV.29 montre qu'à 02 jours d'âge, le mortier avec fillers L5 à maniabilité constante, affiche une amélioration de résistance moins importante qu'à 01 jour, qui atteint 28% et 02 % par rapport au mortier de référence M3-0, à 10 % et 20% du taux de substitution du ciment, respectivement. Cette résistance commence à chuter à partir de 30% du taux de substitution du ciment. Le mortier avec filler L10 donne une amélioration des résistances à 02 jours de 12% à 10% du taux de substitution du ciment, maintient la résistance à 20% du taux de substitution, puis les résistances commencent à chuter. Les mortiers avec fillers L15 présentent des résistances toutes inférieures au mortier de référence.



**Figure IV.29** Variation de la résistance en compression à 02 jours des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante

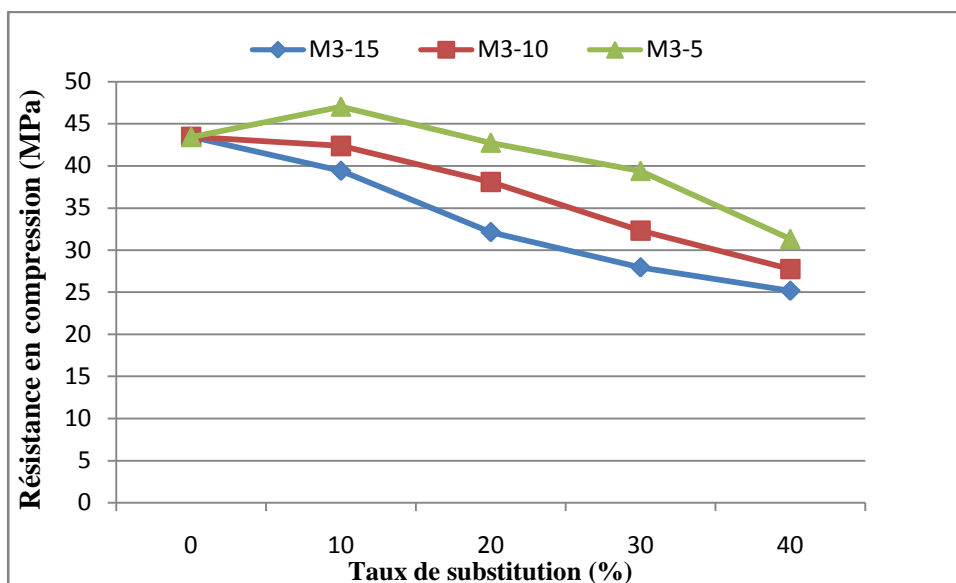
Il ressort donc que l'utilisation des fillers L5 et L10 peut être bénéfique pour l'amélioration des résistances en compression à 02 jours d'âge des mortiers avec ciment C2 à consistance égale, jusqu'à 20% du taux de substitution du ciment. L'ajout des fillers L15 au mortier M3 engendre des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.

Le comportement des mortiers avec fillers calcaires à 03 jours à maniabilité constante (figure IV.30), est similaire à leur comportement à 02 jours. L'apport des fillers L5 aux résistances atteint 21% et 03% à 10% et 20% du taux de substitution, alors que les fillers L10 n'améliorent que 02 % les résistances à 10% du taux de substitution du ciment. Pour des quantités plus importantes, les résistances commencent à chuter. L'ajout des fillers L15 au mortier M3 engendre des chutes de résistances pour tous les taux de substitution.



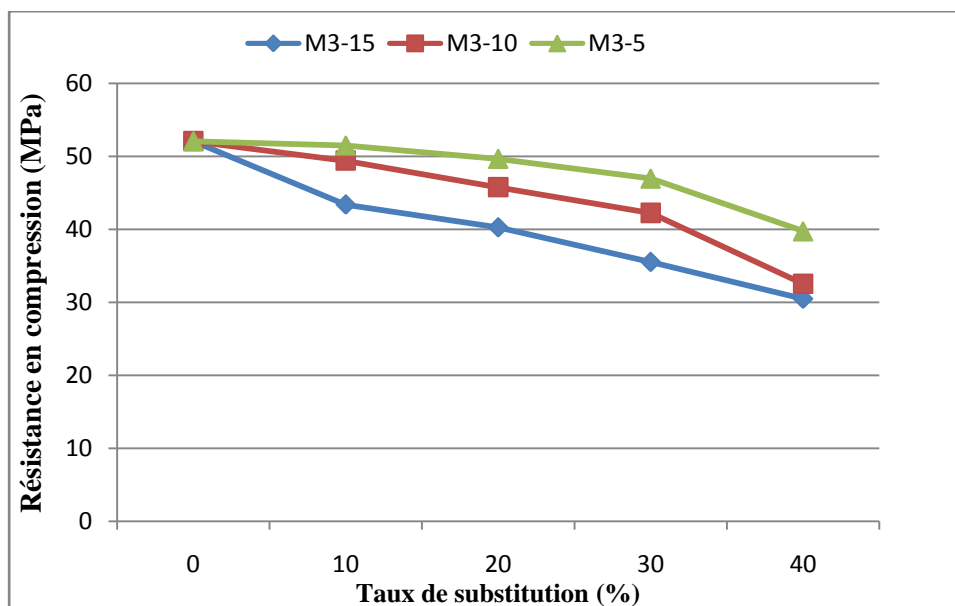
**Figure IV.30** *Variation de la résistance en compression à 03 jours des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante*

A 07 jours, la figure IV.31 montre que l'ajout des fillers calcaires L5 permet d'apporter 08 % d'amélioration aux résistances à 10% du taux de substitution à maniabilité constante et permet de maintenir la résistance du mortier de référence à 20% du taux de substitution. Les fillers L10 ne peuvent que maintenir la résistance du mortier de référence à 10% du taux de substitution du ciment. Pour des quantités plus importantes et pour l'ajout des fillers L15, les résistances chutent pour tous les taux de substitution du ciment.



**Figure IV.31** Variation de la résistance en compression à 07 jours des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante

La figure IV.32 montre que les résistances en compression à 28 jours des mortiers avec fillers L5 et L10 sont maintenues au niveau de la résistance du mortier de référence jusqu'à 20% et 10% du taux de substitution du ciment par l'addition. Pour des quantités plus importantes et pour l'ajout des fillers L15, les résistances chutent pour tous les taux de substitution du ciment.



**Figure IV.32** Variation de la résistance en compression à 28 jours des mortiers M3 en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante

Il ressort donc que l'utilisation des fillers calcaires L5 et L10 dans les mortiers M3 à base de ciment C2 à maniabilité constante, n'altère pas les résistances en compression à 28 jours dans le cas de l'ajout des fillers L5 et L10 jusqu'à 20% et 10% du taux de substitution du ciment, respectivement.

D'après ce qu'on a pu relevé dans ce qui a précédé, nous pouvons avancer que :

L'étude des mortiers avec fillers calcaires L5, L10 et L15 à E/C constant a permis de faire ressortir que l'ajout de toutes les additions calcaires utilisées permettait d'augmenter la fluidité des mortiers avec additions calcaires. Les résultats obtenus montrent que la fluidité des mortiers M1 et M2 est très influencée par l'ajout des fillers calcaires et elle est d'autant plus grande que la quantité de fillers est importante et que la finesse des fillers est réduite.

D'autre part, certains fillers calcaires à quantités réduites permettaient d'avoir un effet chimique favorable aux résistances à courts termes. Ces effets s'escomptent à 28 jours mais les résistances en compression restent acceptables dans certains cas. En effet :

- ✓ L'ajout de 10% de fillers calcaires aux mortiers M2 avec ciment C2 à E/C constant, peut être bénéfique pour les résistances en compression à jeunes âges (01 à 07 jours) dans le cas des fillers L5 de finesse supérieure à celle du ciment, sans pour autant que les résistances à 28 jours ne soient altérées.
- ✓ Les résultats obtenus ont montré que le comportement global des fillers calcaires avec le ciment C2 (CEM I 42.5 R) était meilleur qu'avec le ciment C1 (CEM II 42.5/A). Ce comportement est essentiellement dû à la plus grande finesse du ciment C2 ainsi qu'à sa qualité de durcissement rapide.

En exploitant l'effet granulaire positif des additions calcaires L5, L10 et L15, l'étude des mortiers à base de ciment C2 avec fillers calcaires à maniabilité constante a permis de constater que le besoin en eau des mortiers avec fillers calcaires est d'autant plus faible que la finesse est réduite et que la quantité d'addition dans le mélange est importante.

Dans cette partie nous avons pu optimiser les effets granulaires et chimiques des additions pour mettre en évidence l'apport des fillers calcaires L5 et L10 sur les résistances à courts termes sans altérer les résistances en compression à 28 jours. En effet :

- ✓ L'utilisation des fillers L5 dans les mortiers à base de ciment C2 était bénéfique pour les résistances à courts termes sans altérer la résistance en compression à 28 jours jusqu'à 20% du taux de substitution du ciment par l'addition. L'apport des fillers L5 à la résistance en

compression à 01 jour atteint 74% et 49% à 10% et 20% du taux de substitution du ciment par l'addition, respectivement par rapport au mortier de référence M2-0. Cet apport positif était maintenu jusqu'à 07 jours et 03 jours à 10% et 20% du taux de substitution du ciment par l'addition, sans que les résistances aux autres échéances ne soient altérées.

- ✓ L'utilisation des fillers L10 dans les mortiers à base de ciment C2 était bénéfique pour les résistances à courts termes sans altérer la résistance en compression à 28 jours jusqu'à 10% du taux de substitution du ciment par l'addition. L'apport des fillers L10 à la résistance en compression en compression à 01 jour atteint 36% à 10% du taux de substitution du ciment par l'addition par rapport au mortier de référence M2-0. Cet apport positif était maintenu jusqu'à 03 jours à 10% du taux de substitution du ciment par l'addition, sans que les résistances aux autres échéances ne soient altérées.
- ✓ L'utilisation des fillers L15 dans les mortiers à base de ciment C2 n'était pas bénéfique pour les résistances à courts et moyens termes. L'ajout de fillers L15 engendre des pertes de résistances au mortier de référence à toutes les échéances.

#### **IV.4 Effet des additions calcaires sur les bétons à maniabilité constante :**

L'étude des mortiers avec additions calcaires L5 et L10 à maniabilité constante jusqu'à certains taux de substitution du ciment par les additions, a pu faire ressortir des résultats intéressants pour l'amélioration des résistances en compression à courts termes sans altérer les résistances en compression à 28 jours.

Donc, en utilisant les quantités optimales d'additions calcaires L5 et L10 avec le ciment le plus adapté à la recherche des résistances à courts termes : ciment C2 (CEM I 42.5 R), nous voulons dans cette partie valider les résultats obtenus pour les mortiers aux bétons.

Dans ce cas, les bétons étudiés dans cette phase sont confectionnés par le ciment C2 utilisé dans les phases précédentes et les fillers calcaires L5 et L10 pour des taux de substitution de 10% et 20%.

Les bétons formulés sont désignés par :

B0 : béton de référence sans addition.

B5 : béton avec addition L5.

B10: béton avec addition L10.

#### IV.4.1 Effet des additions calcaires sur le besoin en eau des bétons :

Plusieurs formulations de bétons ont réalisés pour atteindre la maniabilité souhaitée (Affaissement au cône d'Abrams  $A=7\pm 1\text{cm}$ ). ces formulations nous permettront d'évaluer les rapports E/C pour les quels le béton sera plastique et tracer les courbe de besoin en eau pour des bétons avec 10% et 20% de chaque filler L5 et L10.

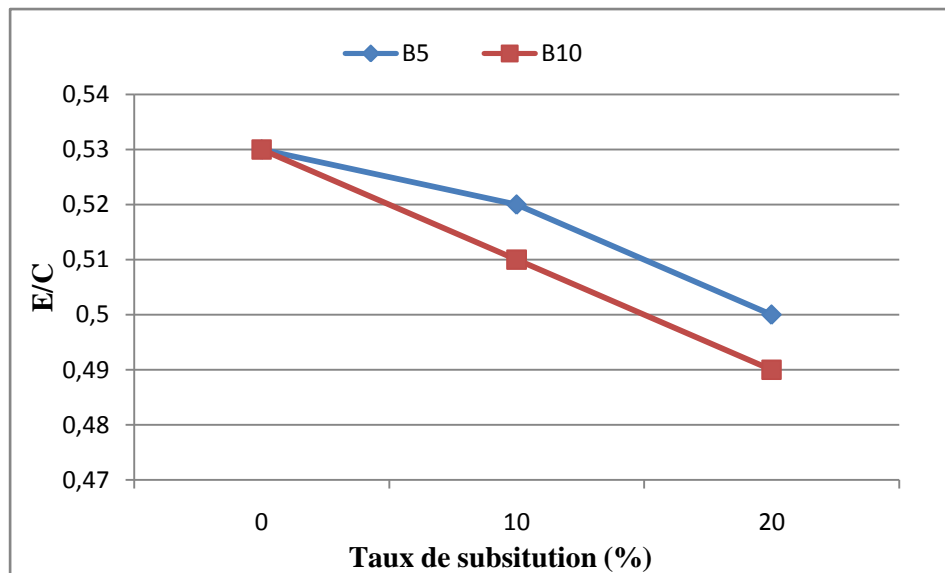
Les besoins en eau des bétons étudiés sont représentés dans le **Tableau IV.9**.

**Tableau IV.9** variation du besoin en eau des bétons avec additions calcaire à maniabilité constante

formulation	ciment	L5(%)	L10(%)	E/C
<b>B0</b>	<b>C2</b>	0	0	0,53
<b>B5</b>	<b>C2</b>	10	0	0,52
<b>B5</b>	<b>C2</b>	20	0	0,50
<b>B10</b>	<b>C2</b>	0	10	0,51
<b>B10</b>	<b>C2</b>	0	20	0,49

La figure **IV.33** représente la variation du besoin en eau des bétons avec additions calcaire L5 et L10 en fonction du taux de substitution massique du ciment par ces fillers.

Nous remarquons que le besoin en eau des bétons avec fillers calcaires B5 et B10 est moins important que celui du béton de référence BO pour les taux de substitution du ciment par l'addition. Le béton B5 présente un besoin en eau plus important à celui du béton B10 pour les taux de substitution du ciment par l'addition. Ce résultat est similaire à celui déjà trouvé par les mortiers est peut être expliqué par le fait qu'à une finesse inférieure à celle du ciment, les grains du filler ajoutés au mélange comblent les vides entre les grains de ciment ce qui permet la réduction du besoin en eau à maniabilité constante. Les fillers L5 jouent le même rôle mais à cause de leur finesse ( $4231 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) plus importante que celle du ciment elles peuvent aussi engendrer un besoin en eau complémentaire.



**Figure IV.33** *Variation du besoin en eau des bétons B5 et B10 avec fillers calcaires en fonction du taux de substitution du ciment par les additions à maniabilité constante*

#### **IV.4.2 Effet des additions calcaires sur la résistance en compression des bétons :**

Pour l'étude des résistances en compression des bétons formulés ; Les essais de compression ont été réalisés sur trois éprouvettes cubiques  $10*10*10 \text{ cm}^3$ , pour les 05 formulations de béton confectionnés a base du ciment C2 (**Tableau IV.10**).

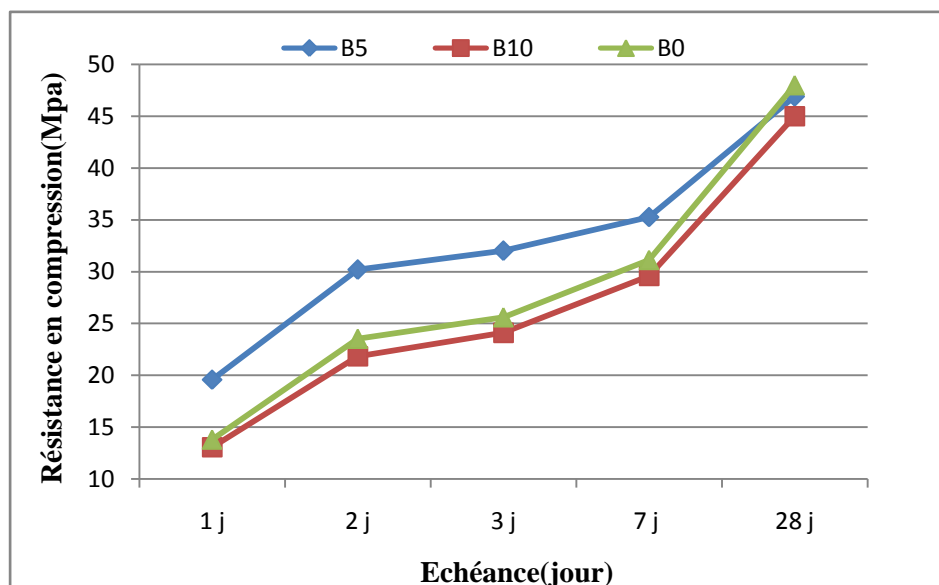
**Tableau IV.10** *Variation des résistances en compression à base de ciment C2 à maniabilité constante*

formulation	ciment	E/C	L5(%)	L10(%)	fc <sub>1</sub>	fc <sub>2</sub>	fc <sub>3</sub>	fc <sub>7</sub>	fc <sub>28</sub>
<b>B0</b>	<b>C2</b>	0,53	0	0	13,82	23,54	25,6	31,14	48,00
<b>B5</b>	<b>C2</b>	0,52	10	0	19,58	30,19	32,02	35,27	46,90
<b>B5</b>	<b>C2</b>	0,50	20	0	12,7	23,38	25,16	30,96	44,33
<b>B10</b>	<b>C2</b>	0,51	0	10	13,08	21,85	24,11	29,6	45,00
<b>B10</b>	<b>C2</b>	0,49	0	20	9,05	17,73	20,26	24,31	42,10

Les figures **IV.34**, et **IV.35** présentent l'évolution de la résistance des bétons à base du ciment C2, en fonction des additions calcaires L5 et L10 à 10% et 20% du taux de substitution en masse du ciment par l'addition calcaire, à maniabilité constante.

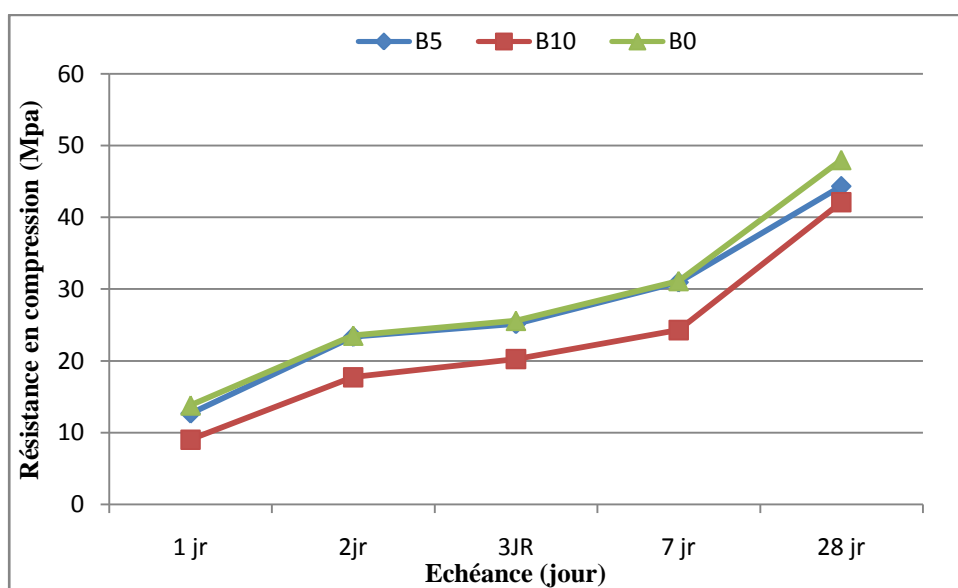
La figure **IV.34** montre qu'à 10% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, le comportement de résistances du béton avec fillers L5, B5 est globalement meilleur que celui du béton de référence B0. L'écart positif de résistance semble important à 01 et 02 jours puis commence à décroître pour 03 et 07 jours pour devenir équivalent à celui du béton B0 à 28 jours.

Le béton avec fillers L10, B10 présente un comportement global inférieur à celui du béton de référence B0 à toutes les échéances, néanmoins l'écart paraît limité.



**Figure IV.34** Evolution de la résistance en compression des bétons avec 10% d'additions calcaires par rapport au béton témoin à maniabilité constante

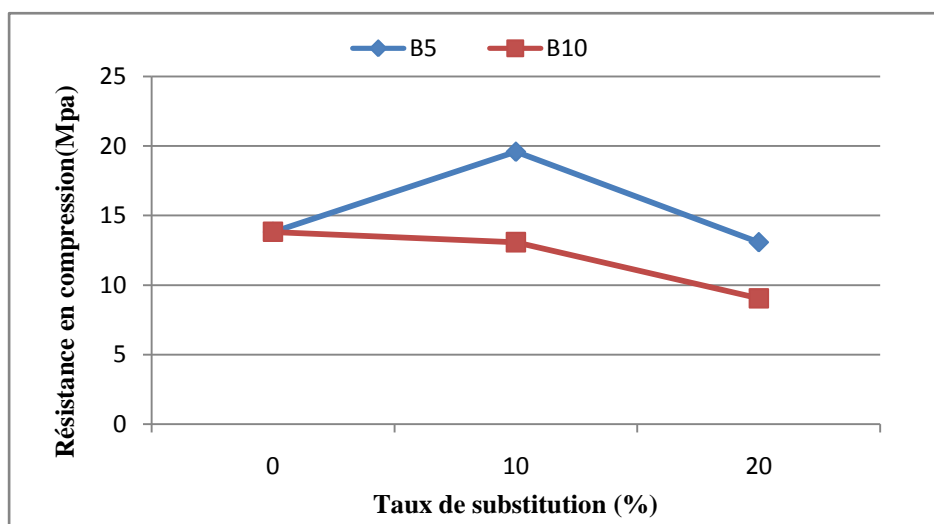
La figure IV.35 montre qu'à 20% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, le comportement de résistances du béton avec fillers L5, B5 est globalement équivalent à celui du béton de référence B0, avec un léger tassement à 28 jours. Le béton avec fillers L10, B10 présente un comportement global inférieur à celui du béton de référence B0 à toutes les échéances, avec des écarts de résistances assez significatifs.



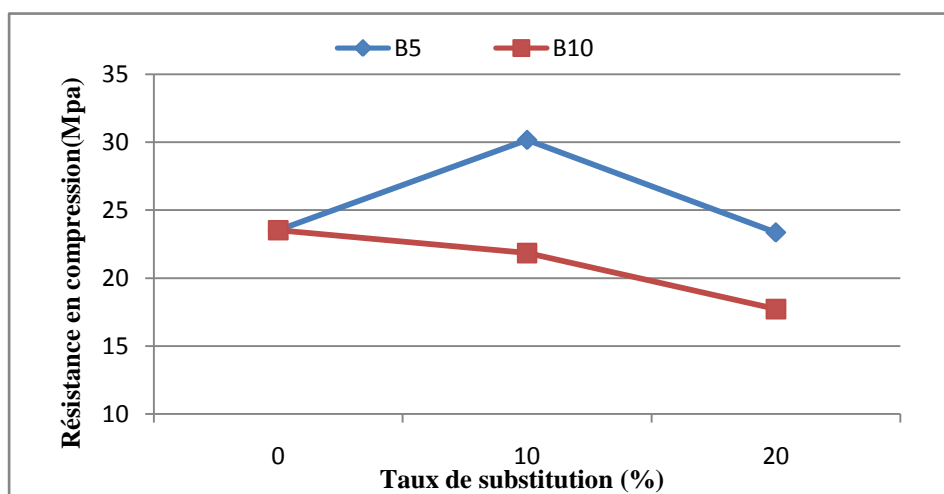
**Figure IV.35** Evolution de la résistance en compression des bétons avec 20% d'additions calcaires par rapport au béton témoin à maniabilité constante

Afin de mieux apprécier le comportement des bétons avec fillers calcaires nous représentons sur les figures **IV.36**, **IV.37**, **IV.38** et **IV.39** la variation des résistances en compression des bétons B5 et B10 à divers échéances (01, 02, 03, 07 et 28 jours), en fonction du taux de substitution du ciment par les additions calcaires à maniabilité constante.

La figure **IV.36** montre qu'à 01 jour d'âge, le béton B5 présente un meilleur comportement que le béton B10. A 10% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, la résistance en compression du béton B5 est supérieure à celle du béton B0 de 42% alors que la résistance du béton B10 est légèrement inférieure de 5%. A 20% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, les résistances des bétons B5 et B10 sont inférieurs à celle du béton de référence B0 avec une perte de résistance limitée de 8% pour le béton B5.



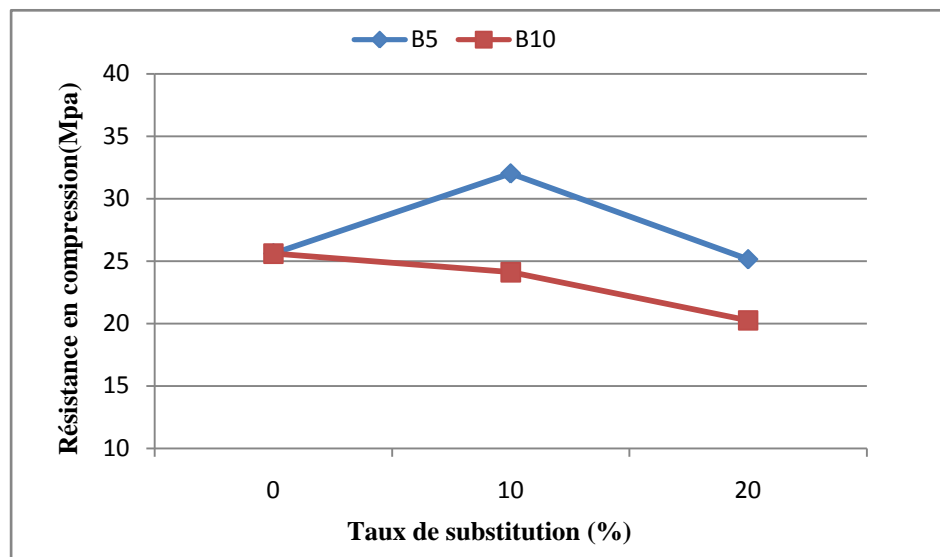
**Figure IV.36** *Variation de la résistance en compression des bétons à 1 jour en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante*



**Figure IV.37** *Variation de la résistance en compression des bétons à 2 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante*

A 02 jours d'âge la figure **IV.37** montre qu'à 10% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, la résistance en compression du béton B5 est supérieure à celle du béton B0 de 28% alors que la résistance du béton B10 est légèrement inférieure de 6%. A 20% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, le béton B5 présente une résistance équivalente à celle du béton B0 alors que le béton B10 présente une résistance beaucoup plus faible que celle du béton B0.

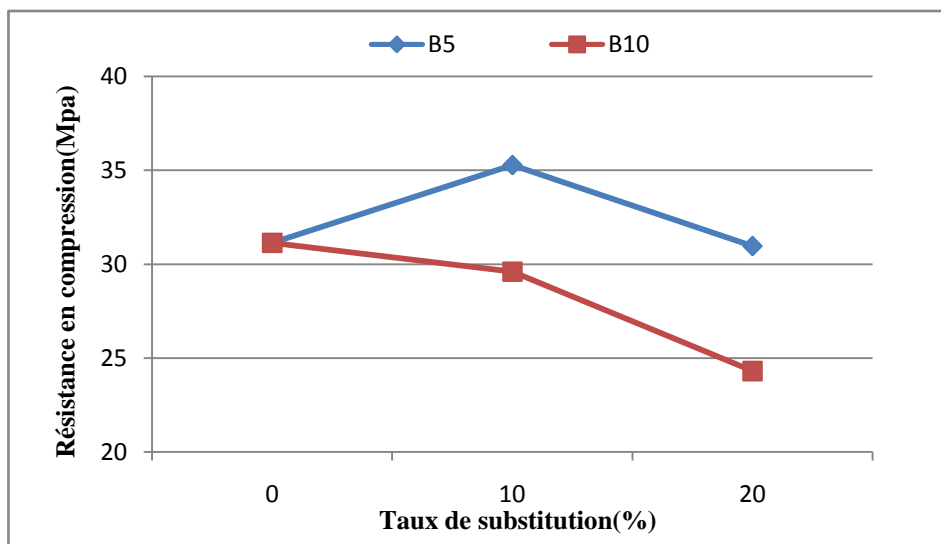
A 03 jours d'âge la figure **IV.38** montre que le comportement des bétons avec additions calcaires est similaire à celui de 02 jours.



**Figure IV.38** *Variation de la résistance en compression des bétons à 3 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante*

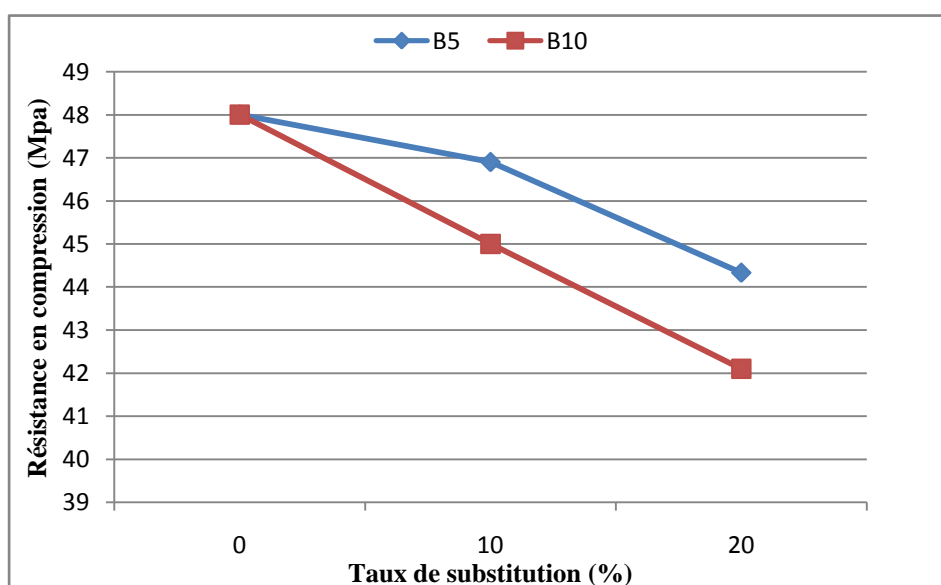
A 10% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, la résistance en compression du béton B5 est supérieure à celle du béton B0 de 25% alors que la résistance du béton B10 est légèrement inférieure de 6%. A 20% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, le béton B5 présente une résistance équivalente à celle du béton B0 alors que le béton B10 présente une résistance beaucoup plus faible que celle du béton B0.

A 07 jours d'âge la figure **IV.39** montre qu'à 10% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, la résistance en compression du béton B5 est supérieure à celle du béton B0 de 13% alors que la résistance du béton B10 est légèrement inférieure de 5%. A 20% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, le béton B5 présente une résistance équivalente à celle du béton B0 alors que le béton B10 présente une résistance beaucoup plus faible que celle du béton B0.



**Figure IV.39** *Variation de la résistance en compression des bétons à 7 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante*

A 28 jours d'âge la figure **IV.40** montre qu'à 10% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, la résistance en compression du béton B5 est légèrement inférieure à celle du béton B0 de 2% alors que la perte de résistance du béton B10 par rapport à B0 atteint 5%. A 20% du taux de substitution du ciment par les additions calcaires, le béton B5 présente une perte de résistance de 08% par rapport à celle du béton B0 alors que le béton B10 présente une perte de résistance beaucoup plus importante qui atteint 12% par rapport à celle du béton B0.



**Figure IV.40** *Variation de la résistance en compression des bétons à 28 jours en fonction du taux de substitution du ciment par l'addition calcaire à maniabilité constante*

#### IV.5 Synthèse :

L'étude de l'utilisation des fillers L5 et L10 dans les bétons à base de ciment C2 (CEM I 42.5 R) à 10% et 20% du taux de substitution du ciment par les additions, permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ✓ L'utilisation de 10% de fillers calcaires L5 en substitution massique du ciment permet d'atteindre des résistances intéressantes à courts termes qui peuvent dépasser de plus 40% de celle du béton de référence B0 à 01 jour d'âge et restent meilleures jusqu'à 07 jours sans altérer la résistance à 28 jours.
- ✓ A 20% du taux de substitution du ciment, les fillers L5 permettent d'atteindre des résistances acceptables à toutes les échéances en assurant une perte de résistance qui ne dépasse pas 10% de la résistance du béton de référence B0.
- ✓ L'utilisation de 10% de fillers calcaires L10 en substitution massique du ciment permet d'atteindre des résistances acceptables à toutes les échéances en assurant une perte de résistance qui ne dépasse pas 10% de la résistance du béton de référence B0.
- ✓ A 20% du taux de substitution du ciment, les fillers L10 réduisent les résistances du bétons à des niveaux trop inférieurs à celles du béton de référence B0.

## *Conclusion générale*

La formulation des bétons qui, pendant très longtemps, a reposé sur une simple association ternaire ciment, eau et granulats, s'est progressivement compliquée au point qu'un béton actuel comporte de façon courante cinq constituants : ciment, eau, granulats, additions minérales et adjuvants. Cet accroissement du nombre de constituants est, d'un point de vue pratique, très avantageux car il conduit, généralement, à l'amélioration très significative des performances rhéologiques et mécaniques des bétons.

Par leur finesse et par leur réactivité plus ou moins importante en présence du ciment, les additions minérales engendrent des modifications significatives sur les propriétés des matériaux cimentaires à l'état frais et durci. A l'état frais, la présence des additions minérales modifie la structure du squelette granulaire et les frictions entre les composants solides dans la phase liquide. Au cours de la prise et du durcissement, les particules des additions peuvent interagir dans le processus d'hydratation du ciment.

Ce sujet s'inscrit dans un objectif global de recherche qui traite de l'amélioration des propriétés à jeunes âges des bétons destinés à la préfabrication pour améliorer le cycle de production d'un banc de préfabrication de poutres précontraintes à l'unité de préfabrication de GESI-PREFA, Teleghma.

Dans ce mémoire, on se propose donc d'utiliser des matériaux locaux à faible coût qui existent en abondance dans notre pays et qui seront introduits dans les bétons en substitution du ciment, pour étudier l'influence de l'addition calcaire sur les propriétés à courts et très courts termes des bétons destinés à la préfabrication sans altérer leurs performances à moyen et long termes. Dans ce contexte, les apports des additions calcaires choisies seront évalués pour envisager leur introduction dans l'industrie de la précontrainte en Algérie.

L'étude bibliographique a permis de maîtriser les connaissances sur l'influence de différentes additions minérales sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des pâtes, mortiers et bétons. La caractérisation des propriétés physico-chimiques et minéralogique des matériaux utilisées a permis de maîtriser ces différentes propriétés afin d'évaluer leur incidence sur les comportements des matériaux cimentaires à l'état frais et durci.

Les mécanismes à l'origine de ces modifications paraissent particulièrement complexes, cependant plusieurs études récentes, s'accordent pour distinguer trois principaux effets des additions dans un matériau cimentaire.

- Un effet granulaire résultant des modifications apportées par l'addition sur la structure granulaire du matériau en présence d'eau et éventuellement d'adjuvant et qui agit sur les propriétés rhéologiques et la compacité des matériaux cimentaires à l'état frais.

- Un effet physico-chimique et microstructural engendré par les multiples interactions entre les particules de l'addition et le processus d'hydratation du ciment et qui agit sur l'évolution de l'hydratation du ciment au cours de la prise et du durcissement.

- Un effet purement chimique propre à certaines additions en milieu cimentaire (essentiellement présent dans le cas des additions du type II selon la norme EN 206-1), qui agit au cours de l'hydratation du ciment et qui interagit fortement avec l'effet physico-chimique et microstructural.

Compte tenu de la complexité des phénomènes mis en jeu, l'approche du sujet a été expérimentale. Les propriétés rhéologiques (écoulement et maniabilité), mécaniques (résistances mécaniques aux différents âges) pour les différents matériaux cimentaires (mortiers et bétons) ont été évalués par des essais conformes aux normes européennes NE.

Les matériaux de base utilisés sont :

- ✓ Les ciments : il s'agit de deux ciments, un ciment CEM I, et un ciment CEM II,
- ✓ Des fillers calcaire à finesse différente: L5, L10 et L15,
- ✓ Du sable 0/5,
- ✓ Des graviers (5/8 et 8/15),
- ✓ et l'eau.

Les essais effectués sur les constituants sont :

- **La composition chimique et minéralogique** : en utilisant la diffraction par rayons x (La fluorescence aux rayons x) Norme P 15-467 et les équations de Bogue.
- **Mesure de La finesse** : par les méthodes suivantes :
  - ✓ La méthode par tamisage : Norme NF EN 196-6
  - ✓ La méthode par perméabilité à l'air (méthode Blaine): Norme NF EN 196-6 :
- **Caractéristiques physiques des granulats utilisés**
  - ✓ Essai Los Angeles (NF P 18-573) :
  - ✓ Analyse granulométrique (NF P 18-560) :
  - ✓ Essai d'équivalent de sable (NF P 18-598) :

Les essais effectués sur les mélanges sont :

➤ **Les essais sur les mortiers :**

- ✓ Essai de consistance par la table à secousses.
- ✓ Résistance en compression des mortiers.

➤ **Les essais sur le béton :**

- ✓ Essai d'affaissement au cône d'Abrams.
- ✓ Résistance en compression des bétons.

L'étude des différentes phases du sujet a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- **Pour l'étude des mortiers à base des ciments C1 et C2 avec fillers calcaires L5, L10 et L15 à E/C constant**

L'ajout de toutes les additions calcaires utilisées permettait d'augmenter la fluidité des mortiers avec additions calcaires. Les résultats obtenus montrent que la fluidité des mortiers M1 et M2 est très influencée par l'ajout des fillers calcaires et elle est d'autant plus grande que la quantité de fillers est importante et que la finesse des fillers est réduite.

D'autre part, certains fillers calcaires à quantités réduites permettaient d'avoir un effet chimique favorable aux résistances à courts termes. Ces effets s'escomptent à 28 jours mais les résistances en compression restent acceptables dans certains cas. En effet :

- ✓ L'ajout de 10% de fillers calcaires aux mortiers M2 avec ciment C2 à E/C constant, peut être bénéfique pour les résistances en compression à jeunes âges (01 à 07 jours) dans le cas des fillers L5 de finesse supérieure à celle du ciment, sans pour autant que les résistances à 28 jours ne soient altérées.
- ✓ Les résultats obtenus ont montré que le comportement global des fillers calcaires avec le ciment C2 (CEM I 42.5 R) était meilleur qu'avec le ciment C1 (CEM II 42.5/A). Ce comportement est essentiellement dû à la plus grande finesse du ciment C2 ainsi qu'à sa qualité de durcissement rapide.

- **Pour l'étude des mortiers à base du ciments C2 avec fillers calcaires L5, L10 et L15 à maniabilité constante**

En exploitant l'effet granulaire positif des additions calcaires L5, L10 et L15, l'étude des mortiers à base de ciment C2 avec fillers calcaires à maniabilité constante a permis de constater que le besoin en eau des

mortiers avec fillers calcaires est d'autant plus faible de la finesse est réduite et que la quantité d'addition dans le mélange est importante.

Dans cette partie nous avons pu optimiser les effets granulaires et chimiques des additions pour mettre en évidence l'apport des fillers calcaires L5 et L10 sur les résistances à courts termes sans altérer les résistances en compression à 28 jours. En effet :

- L'utilisation des fillers L5 dans les mortiers à base de ciment C2 était bénéfique pour les résistances à courts termes sans altérer la résistance en compression à 28 jours jusqu'à 20% du taux de substitution du ciment par l'addition. L'apport des fillers L5 à la résistance en compression en compression à 01 jour atteint 74% et 49% à 10% et 20% du taux de substitution du ciment par l'addition, respectivement par rapport au mortier de référence M2-0. Cet apport positif était maintenu jusqu'à 07 jours et 03 jours à 10% et 20% du taux de substitution du ciment par l'addition, sans que les résistances aux autres échéances ne soient altérées.
- L'utilisation des fillers L10 dans les mortiers à base de ciment C2 était bénéfique pour les résistances à courts termes sans altérer la résistance en compression à 28 jours jusqu'à 10% du taux de substitution du ciment par l'addition. L'apport des fillers L10 à la résistance en compression en compression à 01 jour atteint 36% à 10% du taux de substitution du ciment par l'addition par rapport au mortier de référence M2-0. Cet apport positif était maintenu jusqu'à 03 jours à 10% du taux de substitution du ciment par l'addition, sans que les résistances aux autres échéances ne soient altérées.

L'utilisation des fillers L15 dans les mortiers à base de ciment C2 n'était pas bénéfique pour les résistances à courts et moyens termes. L'ajout de fillers L15 engendre des pertes de résistances au mortier de référence à toutes les échéances.

- **Pour l'étude des bétons à base du ciment C2 avec fillers calcaires L5 et L10 à maniabilité constante**

Les conclusions auxquelles on a abouti permettent d'affirmer que l'introduction des fillers calcaires L5 de finesse de l'ordre 4231  $\mu\text{m}^2/\text{g}$  dans les bétons à des taux de substitution du ciment inférieurs à 10% permet d'aboutir à des gains de résistances importantes à courts termes sans aucune altération des résistances à 28 jours. Le gain de résistance à 01, 02 et 03 jours est tellement intéressant (>20%), qu'il pourrait accélérer le cycle de production des poutres précontraintes.

L'utilisation des fillers calcaires peut être élargi aux fillers L5 jusqu'à des taux de 20% ou aux fillers calcaires L10 jusqu'à des taux de 10% sans altérer les résistances aux diverses échéances. Cette utilisation peut être avantageuse dans le cas des bétons usuels pour envisager des économies de ciment. Il est clair que la réduction de 10 à 20% des quantités de ciment dans les bétons usuels à une échelle régionale ou nationale pourrait avoir un intérêt économique et un moyen de réduction des émissions de CO2 qui accompagnait la fabrication des ciments.

Enfin, la combinaison de l'utilisation des additions calcaires à finesse importantes avec des superplastifiants ou d'accélérateurs de durcissement, éventuellement, et des traitements thermiques peut surement réduire les temps de mise en tension et de décoffrage des poutres précontraintes ce qui permettra une meilleure optimisation des moyens utilisés à l'unité de préfabrication GESI PREFA de Teleghma.

Référence bibliographique :

[1]: **Neville Adam.** (2000), Propriétés des bétons, Edition Eyrolles.

[2]: **Cours en ligne matériaux de construction.**

[3]:**Jacques Baron et Jean-Pierre OLLIVIER,** Les bétons, bases et données pour leur formulation, association technique de l'industrie des liants hydrauliques, Edition Eyrolles, deuxième tirage 1997.

[4]:**M Venuat,** La pratique des ciments, mortiers et bétons – Tome 1 : « Caractéristiques des liants et des bétons, mise en œuvre des coulis et mortiers » - édition2 – Collection Moniteur. – 277p-1989.

[5]: **E.Guillon,** « Durabilité des matériaux cimentaires –Modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », thèse de doctorat, ENS Cachan/ CNRS/ Université Paris 6, France-2004.

[6]: **Georges Dreux et Jean Festa,** Nouveau guide du béton et de ces constituants, Huitième édition 1998, Troisième tirage 2007.

[7]: **Mehta P.K,** Concrete Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, 1986.

[8]: **Regound M.,** L'hydratation du ciment Portland, Le béton hydraulique, Paris, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, p. 193-221, 1982.

[9]: **M. Regourd, H. Hornain,** « Applications de la microscopie électronique à balayage » Revue des matériaux de construction, 693 : 73–87- 1975.

[10]: **Kiran Pokkuluri** « Effect of admixtures, chlorides, and moisture on dielectric properties of Portland cement concrete in the low microwave frequency range» - Master thesis – Virginia University – 210p - October 1998.

[11]: **Pliskin L.,** La fabrication du ciment, Edition Eyrolles, 1993.

[12]: **Y. Older** , « Hydration, setting and hardening of Portland cement », dans Lea's - Chemistry of Cement and Concrete, chap.6, Arnold, 4<sup>th</sup> éd- 1998.

[13]: **R. Gané** « Cours de durabilité et Réparation des bétons » - Chapitre 2- Université de Sherbrooke –p32 - Canada 2002

[14]: **A. Boudchicha,** Cours de MDC, Magister Matériaux et durabilité des bétons, 2010, Département de Génie Civil, Université Larbi Ben M'hidi Oum Bouaghi  
[15]: **KOSMATK.A S.H., PANARESE W.C., ALLEN G.E. et CUMMING S,** 1991, Dosage et contrôle des mélanges de béton, Canadian Portland Cement Association, Ed., Ottawa, 1991, 5ème édition, EB 101.05 T (F).

- [16]: **BYFORS J.**, 1980, Plain concrete at early ages, Swedish Cement and Concrete Research Institute at the Institute of Technology, Ed., Stockholm, 1980, CBI Research 3:80
- [17]: **Lawrence P., Cyr M., Ringot E.**, Mineral admixtures in mortars: effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strength, *Cement Concrete Research*, vol. 35 p. 1092-1105, 2005
- [18]: **A.Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche**, Effects of the admixtures reactivity on the strength of mortars: Application of the predictive model of Bolomey, *Asian Journal of Engineering (Building and Housing)*. 2007; Vol. 8, N° 1:13-24 (ISSN 1563-0854).
- [19]: **Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B.**, The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars, *Cement and concrete research* Vol. 36, p. 1719-1726, 2006.
- [20]: **Jean Louis Gallias**, durabilité des bétons, cours magister, Université de Laarbi Ben M'hidi Oum el Bouaghi, Algérie ,2011
- [21]: **Abdelaaziz Boudchicha, Mustapha Cheikh Zouaoui , and J-L Gallias**, Influence of the Parameters of Formulation on the Fresh Properties of Cementing Materials with Admixtures, *Materials Science Forum* 2013, Vols. 730-732 (2013) pp 456-461.
- [22]: **Zhang X., Han J.**, The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste, *Cement and concrete research* Vol. 30, p. 827-830, 2000.
- [23]: **Anissa Bessa-Badreddine A.**, Etude de la contribution des additions minérales aux propriétés physiques mécaniques et de durabilité des mortiers, Thèse de doctorat de l'université de Cergy Pontoise, 2004.
- [24]: **Benzet J. C. and Benhassine A.**, The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder, *Powder Technology*, Vol. 103, p. 26-29, 1999.
- [25]: **Lawrence P.**, Sur l'activité des cendres volantes et des additions minérales chimiquement inertes dans les matériaux cimentaires, Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse III, 2000.
- [26]: **Memon A. H., Radin S. S., Zain M. F. M., Trottier J. F. ,** Effect of mineral and chemical admixtures on high-strength concrete in seawater, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, p. 373-377, 2002.
- [27]: **Manjit S., Mridul G.**, Cementitious binder from fly ash and other industrial wastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, p. 309-314, 1999.
- [28]: **Caré S., Linder R., Baroghel Bouny V., De Larrard F., et Charonnat Y.**, Effet des

additions minérales sur les propriétés d'usage du béton-Plan d'expérience et analyse statique, LCPC, Ouvrages d'art OA 33, février 2002.

[29]: **Boudchicha et al** Effect of the admixtures reactivity on the strength of mortars: Application of the predictive model for BOLOMAY, Asian Journal of CIVIL ENGINEERING (BUILDING AND HOUSING) VOL. 8, NO.1 PAGES 13-24(2007)

[30]: **De Larard F., Moreau A., Buil M. and Paillere A. M.**, Improvement of mortars and concretes really attributable to condensed silica fume, 2<sup>nd</sup> International conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans, Vol. 2, p. 959-971, Madrid 1986.

[31]: **Chahinez A** Contribution à l'étude de l'influence des différents ajouts sur les propriétés des matrices cimentaires (Caractérisation, Performances, Durabilité), Thèse de doctorat de l'université de Mentouri, Constantine 2009.

[32]: **Manai K.**, Etude de l'effet d'ajouts chimiques et minéraux sur la maniabilité, la stabilité et les performances des bétons auto nivelant, Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées, Sherbrooke, Canada, 1995

[33]: **Boudchicha A.**, Action des additions et superplastifiants sur les mortiers et bétons: Etudes des propriétés rhéologiques et mécaniques, Editions Universitaires Européennes, 2011, ISBN : 978-3-8417-8185-7

[34]: **Appa Rao G.**, Development of strength with age of mortars containing silica fume, Cement and Concrete Research, Vol. 31, p. 1141-1146, 2001.

[35]: **Kwan A. K. H.**, Use of condensed silica fume for making high-strength self-consolidating concrete, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 27, p. 620-627, 2000.

[36]: **Demirboga R.**, Influence of mineral admixtures on thermal conductivity and compressive strength of mortar, Energy and building Vol. 35, p. 189-192, 2003.

[37]: **Lange F., Mortel N., Rudert V.**, Dense packing of cement pastes and resulting consequences on mortar properties, Cement and concrete research Vol. 27, p. 1481-1488, 1997

[38]: **Felekoglu B., Tosun K., Baradan B., Altun A., Uyulgan B.**, The effect of fly ash and limestone fillers on the viscosity and compressive strength of self compacting repair mortars, Cement and concrete research Vol. 36, p. 1719-1726, 2006.

[39]: **Lewandowski R.**, Versuchsreihe mit Flugasche - Einfluss von Flugasche-St äuben unterschiedlicher Qualität auf die betoneigenen schafften, Baugewerbe, p. 44-49, 1983.

[40]: **Aichoube A., Ghrici M., Benaissa A.**, Effet de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf sur les propriétés d'un ciment à base de calcaire, Colloque Méditerranéen sur les Matériaux CMEDIMAT, Oran, Algérie, 6-7 décembre 2005

[41]: **Houhou M. N., Mezghiche B.**, Influence de l'ajout pouzzoulanique sur le comportement mécanique de la pâte de ciment, 2ème colloque Maghrébin en Génie Civil, p. 129-137, Biskara, Algérie, 10-11 décembre 2002.

[42]: **Toufik Boubekour, Bensaid Boulekbache, Ali Makhelouf.**, Influence du laitier sur les propriétés des ciments à base de calcaire "SICZS\_2010" Symposium International sur la Construction en Zone Sismique Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), 26 – 27 octobre 2010.

[43]: **Hadj Sadok Ahmed - Kenai Said - Menadi Belkacem**, "Résistances aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier", Colloque International - Caractérisation et Modélisation des Matériaux et Structures - Université M. Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie Les 16, 17 et 18 novembre 2008.

[44]: **Nonat A.**, 1994, Interactions between chemical evolution (hydratation) and physical evolution (setting) in the case of tricalcium silicate, *Materials and Structures*, 1994.

[45]: **Benzet J. C. and Benhassine A.**, The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder, *Powder Technology*, Vol. 103, p. 26-29, 1999.

[46]: **Jean Péra, Sophie Husson, Bernard Guilhot**, Influence of finely ground limestone on cement hydration, *Cement and Composites Concrets* 21,99-105, 1999.

[47]: **Husson S.**, Etude physico-chimique et mécanique des interactions ciment - fillers: application aux mortiers, Thèse de l'école normale supérieure des mines de Saint-Étienne, 1991.

[48]: **A. Boudchicha, M. Cheikh Zouaoui, J.-L. Gallias, B. Mezghiche**, Analysis of the effects of mineral admixtures on the strength of mortars, *Journal of Civil Engineering and Management*. 2007, Vol. 13, N° 2:87-96 (ISSN 1392-3730).