

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université Ain-Temouchent - Belhadj Bouchaib -
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Civil et Travaux Publics



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE
Filière : TRAVAUX PUBLICS
Spécialité : VOIES ET OUVRAGES D'ART
Thème

Influence de l'Argile Bentonite sur le temps de prise et le retrait
de la pâte cimentaire modifiée avec un adjuvant superplastifiant.

Présenté Par :

Banza wa sakula Erick & Abada Mohammed

Devant le jury composé de :

Dr. Bendouina khadidja	MCA	UAT.B.B (Ain-Temouchent)	Présidente
Dr. Djellil Mohammed	MCB	UAT.B.B (Ain-Temouchent)	Examineur
Dr. Kameche Zine El-Abidine	MCA	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année scolaire : 2023-2024

Remerciements

Nous exprimons notre profonde gratitude envers Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la santé et la détermination nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre promoteur, **Monsieur Zine El Abidine Kameche**, pour son soutien, ses conseils éclairés et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour avoir consacré leur temps à l'évaluation de ce mémoire. Leurs critiques constructives et leurs commentaires enrichissants contribueront grandement à notre développement académique et professionnel.

Enfin, un immense merci à nos familles pour leur soutien moral et financier, ainsi que pour leurs nombreux sacrifices, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible.

BANZA Wa SAKULA Erick & ABADA Mohammed

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes chers parents : **Maman Chatty Shimbi, Papa Job Nshimba et mon Général Mpanga Mukutu Pozard**. Aucun mot ne saurait exprimer pleinement mes sentiments sincères à leur égard. Leur patience sans fin, leur soutien indéfectible malgré la distance et les années accumulées, et leur aide précieuse ont été des piliers dans ma vie. Avec tout mon amour et mon respect, je reconnais leurs grands sacrifices. Malgré la distance, ils n'ont jamais cessé de croire en moi, et pour cela, je leur suis éternellement reconnaissant.

À mes chères sœurs : Marina, Junette, Nathalie, Gloria et Christivie, dont l'affection et le soutien m'ont toujours accompagné.

À mes précieux frères : Apôtres Junior, Franckis Kamuze et Glodi Shimbi, pour leur fraternité et leurs encouragements constants.

À toute ma famille Shimbi, et en particulier : Papa Évêque Mpanga, Maman Ruth, Tante Rachel et Tante Jeanne, pour leur amour inconditionnel et leur soutien.

À ma bien-aimée Alina ngolu nabala, pour son amour et son soutien constants.

À mes chers amis : Descartes Mpempa, Jonathan Ongeni, David Nedi et Marcel Kifwa, Odin bwete Lola , pour leur amitié précieuse et leur soutien infaillible.

À mon binôme : Abada, pour son aide et sa camaraderie inestimables.

Sans oublier les ingénieurs du laboratoire de Génie civil, Mr Adel, Mm Kaoutar et Mm Najat, nous serons toujours reconnaissants envers vous...

À tous mes camarades de classe, pour les moments partagés et le soutien mutuel.

BANZA WA SAKULA Erick

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À ma mère, pour son amour, ses encouragements et ses sacrifices,

À mon père, pour son soutien, son affection et la confiance qu'il m'a accordée,

À tous les membres de ma famille,

À tous mes amis,

À tous les professeurs et camarades de classe,

Sans oublier mon binôme, **BANZA Wa SAKULA Erick**,

Et aux ingénieurs du laboratoire : **M. Adel, Mme Kaoutar et Mme Najat, pour leur aide précieuse.**

Abada Mohammed

Résumé

Les additions minérales sont de plus en plus souvent utilisées par les producteurs des bétons et des pâtes. Leur prise en compte dans la formulation des matériaux cimentaires pour le respect du dosage minimum en ciment (substitution d'une quantité de ciment par ajout minéral) revêt un intérêt particulier sur le plan économique (réduction du coût des matières premières) et écologique (réduction des émissions de CO₂ et de la consommation de ressources non renouvelables).

Cette étude est dans le but de valoriser une argile Bentonite de la région de Maghnia sous forme de poudre calcinée (traitée thermiquement) dans une pâte à l'état frais et durci, dont l'intérêt majeur est donné aux propriétés mécaniques et physiques du matériau. Alors, l'influence de différents dosages en Bentonite (5, 10, 15 et 20 %) a été étudiée expérimentalement dans une pâte adjuvante avec un rapport E/L égal à 0.28. Les objectifs principaux de ce travail sont d'étudier l'influence de la Bentonite sur l'évolution de l'absorption capillaire et de l'air occlus, ainsi que sur l'évolution du temps de prise et de retrait de dessiccation du matériau à l'état durci. Des relations mathématiques sont donc élaborées, dans cette étude, entre une propriété physique (le retrait) et une propriété mécanique (la résistance à la compression).

Mots clés : Pâte, Argile Bentonite, Résistance Mécanique, Retrait, Absorption Capillaire.

ملخص

يتم استخدام المضافات المعدنية بشكل متزايد من قبل منتجي الخرسانة والملاط. إن أخذها في الاعتبار عند إنتاج المواد الأسمنتية للامتثال للحد الأدنى من كمية الأسمنت (استبدال كمية من الأسمنت بالمعادن المضافة) له أهمية خاصة على المستوى الاقتصادي (خفض تكلفة المواد الخام) والمستوى البيئي (تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون والاستهلاك) من الموارد غير المتجددة.

تهدف هذه الدراسة إلى تمييز طين البانتونيت المستخرجة من منطقة مغنية على شكل مسحوق مؤكسد (معالج حرارياً) في ملاط في الحالة الرطبة والمتصلبة، مع إعطاء الاهتمام الرئيسي للخصائص الميكانيكية والفيزيائية للمادة. لأجل ذلك، تمت دراسة تأثير نسب مختلفة من البانتونيت (5، 10، 15 و 20%) تجريبياً على خلطة ملاط مؤشرة بنسبة (الماء على الرابط) E/L تساوي 0.28. الأهداف الرئيسية لهذا العمل هي دراسة تأثير البانتونيت على تطوّر الامتصاص الشعري والهواء المحجوز في العجينة الرطبة، وكذلك على تطوّر زمن التصلب والانكماش الكلي للمادة في الحالة المتصلبة. في هذه الدراسة، تم إعطاء علاقات رياضية، بين بعض الخصائص الفيزيائية والميكانيكية المحددة في الحالات الطازجة والمتصلبة.

الكلمات المفتاحية: الملاط، طين البانتونيت، المقاومة الميكانيكية، الانكماش، الامتصاص الشعري

Abstract

Mineral additions are increasingly used by concrete and mortar producers. Their consideration in the formulation of cementitious materials for compliance with the minimum cement dosage (substitution of a quantity of cement by mineral addition) is of particular interest on the economic (reduction in the cost of raw materials) and ecological (reduction CO₂ emissions and consumption of non-renewable resources).

This study aims to valorize a Bentonite clay from the Maghnia region in the form of calcined powder (heat treated) in a mortar in the fresh and hardened state, where the major interest of which is given to the mechanical and physical properties of the material. So, the influence of different Bentonite dosages (5, 10, 15 and 20%) was studied experimentally in an adjuvanted mortar with a E/L ratio equal to 0.28. The main objectives of this work are to study the influence of Bentonite on the evolution of capillary absorption and occluded air, as well as on the evolution of the setting time and the shrinkage of the material in its hardened state. In this study, mathematical relationships are developed between certain physical and mechanical properties determined in the fresh and hardened states.

Keywords: Mortar, Bentonite Clay, Mechanical Resistance, Shrinkage, Capillary Absorption.

SOMMAIRE

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Synthèse Bibliographique

I.1 INTRODUCTION	6
I.2 HISTORIQUE DE CIMENT	6
I.3 FABRICATION DE CIMENT.....	7
I.3.1 Le principe de la fabrication du ciment.....	8
I.3.2 Constituants principaux et additions.....	11
I.4 CARACTERISTIQUES ET EMPLOIS DES CIMENTS.....	13
I.5 HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND.....	16
I.5.1 Introduction.....	16
I.5.2 Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland.....	16
I.5.3 Hydratation des silicates	17
I.5.4 Hydratation des aluminates	17
I.5.5 Conclusion	18
I.6 LES AJOUTS MINÉRAUX	19
I.6.1 Introduction.....	19
I.6.2 Classification des ajouts minéraux	20
I.6.3 Les ajouts minéraux actifs	20
I.6.4 Ajouts minéraux inertes	22
I.6.5 Les adjuvants	25
I.7 MESURE DE RETRAIT	27
I.7.1 Retrait Endogène :	28
I.7.2 Retrait Exogène :	28
I.7.3 Effets des additions minérales	29
I.8 CONCLUSION	30

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

II.1 INTRODUCTION	33
II.2 IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISÉS	33
II.2.1 Le ciment	34
II.2.2 La Bentonite (la Maghnite).....	42
II.3 PREPARATION DES EPROUVETTES	46
II.4 MESURES EXPERIMENTALES.....	48
II.4.1 Essai sur pate à l'état frais	48

II.4.2 Les essais durcis.....	52
II.5 ETUDE EXPERIMENTALE	55
II.5.1 Campagne des essais expérimentaux.....	56
II.6 CONCLUSION	56
III.1 INTRODUCTION	59

Chapitre III : Analyse et discussions des résultats

III.2 INFLUENCE DE LA BENTONITE CALCINÉE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DE LA PÂTE CIMENTAIRE À L'ÉTAT FRAIS.....	59
III.2.1 Résultats de la maniabilité	59
III.2.2 Résultats de l'air occlus	61
III.3 INFLUENCE DE LA BENTONITE CALCINÉE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA PÂTE CIMENTAIRE À L'ÉTAT DURCI	62
III.3.1 Résultats de la résistance à la traction par flexion.....	62
III.4 INFLUENCE DE LA BENTONITE CALCINÉE SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUE DE LA PÂTE CIMENTAIRE À L'ÉTAT DURCI	65
III.4.1 Résultat de la Sorptivité capillaire.....	65
III.4.2 Résultat de Retrait total	70
III.4.3 Corrélation entre la résistance mécanique à la compression et le retrait des pâtes étudiées à l'état durci.....	72
III.5 CONCLUSION	74
Conclusion Générale.....	76
Références.....	78

LISTE DES FIGURES

Fig. I-1. Le schéma de la fabrication du ciment	9
Fig. I-2. Les processus de fabrication du ciment par voie sèche suivant plusieurs étapes clés la transformation des matières premières en produits finals [3]	11
Fig. I-3. Microphotographie d'un clinker	12
Fig. I-4. Courbe caractéristique de la calorimétrie isothermique d'un ciment découpé en quatre périodes [5].....	17
Fig. I-5. Mécanismes d'action des adjuvants superplastiques.....	27
Fig. II-1. Appareil de VICAT avec la sonde pour la mesure de la consistance du ciment.....	36
Fig. II-2. Évolution de la consistance du ciment CEM I en fonction du rapport E/C	37
Fig. II-3. Evolution de la consistance des différentes pâtes modifiées par un superplastifiant en fonction de la teneur en Bentonite calcinée.....	38
Fig. II-4. Dispositif expérimental de l'appareil Le Chatelier	39
Fig. II-5. Perméabilimètre Blaine (Labo. de G. Civil - Univ. d'Ain Témouchent)	40
Fig. II-6. Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine	41
Fig. II-7. Moules d'éprouvettes prismatiques (4 x 4 x 16) cm ³	47
Fig. II-8. Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20 ± 2 °C selon la norme NF P 15-402. 48	
Fig. II-9. Principe de fonctionnement du maniabilimètre	49
Fig. II-10. Dispositif de mesure de la teneur en air occlus (aéromètre)	50
(Labo. de G. Civil - Univ. d'Ain Témouchent)	50
Fig. II-11. Influence de la teneur en Bentonite calcinée sur la quantité d'air occlus dans les pâtes étudiées.....	51
Fig. II-12. Appareil de VICAT muni d'une aiguille pour la mesure du temps de prise.....	51
Fig. II-13. Variation du temps de prise des différentes pâtes des ciments étudiés	52
Fig. II-14. Dispositif pour l'essai de la résistance à la traction par flexion de la pâte	53
Fig. II-15. Dispositif pour l'essai de la résistance à la compression de la pâte.....	53
Fig. II-16. Ecrasement des éprouvettes (40x40x160) cm ³ à l'aide d'une presse hydraulique de 250KN (Lab. de G. civil-UAT)	54
Fig. II-17. Schéma du principe de l'essai d'absorption	54
Fig. II-18. Organigramme représentatif des différents essais effectués	56
Fig. III-1. Variation de la maniabilité dans les pâtes à base de la Bentonite calcinée.	60

Fig. III-2. Variation des pourcentages d'air occlus dans les pâtes à base de la Bentonite calcinée.....	61
Fig. III-3. Influence de dosage en Bentonite sur l'évolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des pâtes testées.	63
Fig. III-4. Influence de dosage en Bentonite sur l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des pâtes testées.	64
Fig. III-5. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine Carrée du temps des pâtes testées à l'âge de 14 jours.	66
Fig. III-6. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine Carrée du temps des pâtes testées à l'âge de 90 jours.	67
Fig. III-7. Evolution de coefficient la sorptivité capillaire de la pâte testée à l'âge de 14 jours.	69
Fig. III-8. Evolution de coefficient la sorptivité capillaire de la pâte testée à l'âge de 90 jours.	70
Fig. III-9. Evolution du retrait total des pâtes à base de la Bentonite calcinée.	71
Fig. III-10. Relation entre la résistance à la compression et le retrait total des différentes pâtes cimentaires étudiées.	74

LISTE DES TABLEAUX

Tab. I-1. Différents types de ciments courants[6]	15
Tab. I-2. Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment [8]	26
Tab. II-1. Composition chimique du ciment Portland CEM I 42,5 N SR 3.....	35
Tab. II-2. Composition minéralogique du ciment Portland utilisé (CEM I 42,5 N SR 3).....	35
Tab. II-3. Procédure du malaxage de la pâte du ciment selon la norme NF EN 196-3	36
Tab. II-4. Caractéristiques physiques du ciment CEM I 42.5 N SR 3	41
Tab. II-5. La surface spécifique Blaine des différentes poudres (ciment + Bentonite)	42
Tab. II-6. Composition chimique de la Bentonite (la Maghnite) utilisée.	44
Tab. II-7. Composition minéralogique de la Bentonite de Maghnia.....	45
Tab. II-8. Caractéristiques physiques de la vase calcinée	46
Tab. II-9. Les différentes compositions des pate étudiées	46
Tab. II-10. Type de pate selon le temps de maniabilité	49

Introduction générale

Introduction générale

Le ciment demeure un élément crucial dans l'industrie mondiale de la construction. Cependant, sa production demande une quantité significative d'énergie, ce qui entraîne une émission considérable de CO₂, contribuant ainsi de manière importante au réchauffement climatique, responsable d'environ 65 % des émissions totales de gaz à effet de serre. À elle seule, l'industrie cimentière génère environ 7 % de ces émissions mondiales. Face à cette réalité, les producteurs de matériaux cimentaires se tournent de plus en plus vers l'utilisation d'additions minérales. Cette approche vise à remplacer une partie du ciment, permettant ainsi de réduire la consommation énergétique nécessaire à sa fabrication, tout en diminuant les quantités de clinker, les émissions de CO₂ et d'autres gaz polluants, ainsi que la production de poussière dans les cimenteries. Ces mesures de réduction entraînent non seulement des avantages économiques évidents mais contribuent également à la préservation de l'environnement.

Ainsi, ce projet de recherche s'attache à explorer les possibilités d'exploitation de la Bentonite dans la production de matériaux cimentaires, particulièrement dans le cadre du développement industriel en Algérie. Dans cette étude, nous avons porté un intérêt particulier à un ajout inerte, la bentonite de Maghnia. La croissance rapide de l'industrie en Algérie entraîne une hausse notable de la demande en matériaux de construction, notamment le ciment. Dans cette optique, l'objectif ultime est de valoriser notre ressource en Bentonite en l'incorporant dans la fabrication des matériaux cimentaires, en substituant partiellement le ciment. Plus précisément, il s'agit d'étudier les méthodes pour intégrer la Bentonite dans le processus de fabrication du ciment afin d'en optimiser l'utilisation et de contribuer ainsi au développement durable de l'industrie de la construction en Algérie.

Dans cette étude, nous avons entrepris une recherche expérimentale afin de valoriser l'incorporation de la bentonite dans des pâtes ordinaires par substitution du ciment CEM1. Notre objectif principal était d'évaluer, de manière empirique, l'influence de différents pourcentages de substitution en ciment CEM1 (0, 5, 10, 15 et 20 %) sur les propriétés physiques et mécaniques de ces pâtes, en tenant compte de rapports eau/liant (E/L : 0,28). Toutes ces expérimentations ont été menées au sein de notre laboratoire. En outre, notre démarche a également permis une comparaison entre les résultats obtenus par des essais destructifs, ces derniers étant des méthodes de mesure préservant l'intégrité des échantillons testés.

Le premier chapitre de cette synthèse bibliographique aborde deux aspects principaux. Tout d'abord, il examine l'impact environnemental de l'industrie cimentaire. Cette industrie est

Introduction générale

souvent associée à diverses formes de pollution et de dégradation de l'environnement. Ensuite, le chapitre explore les possibilités de valorisation de la bentonite comme substitut au ciment dans la fabrication de matériaux cimentaires. Ce matériau alternatif présente un intérêt particulier en raison de ses propriétés. Enfin, ce chapitre met en lumière les résultats de recherches antérieures portant sur le comportement mécanique des bétons contenant de la bentonite. Ces travaux fournissent des données importantes pour évaluer l'efficacité et les implications de l'utilisation de la bentonite dans la construction de matériaux cimentaires.

Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous nous concentrons sur une description détaillée et une caractérisation des matériaux utilisés pour la préparation des pâtes étudiés. Nous présentons également les procédures de préparation et de fabrication des pâtes testés, ainsi qu'une explication des méthodes expérimentales employées. Les essais expérimentaux réalisés au cours de notre recherche portent sur l'étude des propriétés des pâtes ordinaires. Les différentes étapes et protocoles expérimentaux sont minutieusement détaillés dans ce chapitre pour une meilleure compréhension des méthodes utilisées.

Un ensemble de formulations de pâtes ordinaires a été préparé en utilisant des matériaux locaux et en maintenant une composition uniforme du ciment. Cependant, les rapports E/L (eau sur liant) variaient 0,28, tout comme les dosages en bentonite (0 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 %) pour la substitution partielle du ciment. Après avoir caractérisé les matériaux utilisés dans la fabrication des pâtes étudiés, les premières étapes des investigations ont porté sur l'état frais des pâtes..

Dans la troisième section de ce document, nous exposons les résultats expérimentaux issus des divers essais réalisés sur les pâtes à l'état durci. Ces essais comprennent la mesure de la résistance à la flexion et à la compression et de l'absorption capillaire du matériau. Ces résultats fournissent des insights précieux sur les propriétés mécaniques et physiques des pâtes étudiés, permettant ainsi une évaluation approfondie de leur comportement et de leurs performances dans des conditions variées.

Dans ce chapitre, nous allons examiner de près les résultats obtenus et les analyser en détail. Nous comparerons également les différentes méthodes de mesure utilisées pour évaluer ces résultats.

Introduction générale

De plus, nous établirons des liens entre les propriétés physiques et mécaniques des pâtes, Nous développerons également des équations mathématiques dans ce chapitre pour mieux comprendre comment ces différents paramètres interagissent à différents stades de maturité de la pâte. Ces équations offriront un cadre analytique pour interpréter les caractéristiques du matériau et son comportement mécanique dans diverses conditions.

En conclusion de cette étude expérimentale sur la valorisation de la bentonite en tant qu'additif, partiellement substitué au ciment dans divers pâtes ordinaires, nous présentons des conclusions générales à la fin de ce document. Ces conclusions synthétisent les principales découvertes, les résultats significatifs et les implications de notre recherche. Elles offrent également des perspectives sur l'application potentielle de la bentonite dans l'industrie des matériaux de construction, ainsi que des recommandations pour des études futures dans ce domaine.

Chapitre I. Synthèse bibliographique

I.1 INTRODUCTION

L'intégration de sous-produits industriels dans la fabrication du ciment est devenue une pratique cruciale pour promouvoir le développement durable et la protection de l'environnement dans l'industrie du ciment. Plutôt que d'être gaspillés ou considérés comme des déchets, ces sous-produits, tels que les cendres volantes ou les laitiers de hauts fourneaux, sont utilisés comme ingrédients dans la production de ciment. Cette approche présente de nombreux avantages : elle réduit les émissions de CO₂ en remplaçant une partie du ciment Portland, elle valorise efficacement des matériaux qui seraient autrement des déchets, améliore les propriétés du ciment telles que sa durabilité et sa résistance, et diminue la dépendance aux ressources naturelles. Cependant, pour garantir la qualité et la sécurité du ciment ainsi produit, il est essentiel de respecter des normes strictes et de mener des tests approfondis.

Le chapitre est divisé en deux sections distinctes. La première partie aborde les notions générales concernant la fabrication du ciment, ses répercussions sur l'environnement, ainsi que les principes fondamentaux relatifs à l'hydratation des ciments et à l'utilisation de matériaux minéraux dans les bétons et pâtes. La seconde partie se penche plus spécifiquement sur la réactivité de la bentonite en tant qu'additif dans les matériaux cimentaires. Elle examine également les divers facteurs susceptibles d'influer sur cette réactivité et, par extension, sur la résistance mécanique du matériau. Cette organisation offre une approche structurée pour explorer en profondeur le sujet.

I.2 HISTORIQUE DE CIMENT

L'histoire de la fabrication du ciment remonte à l'Antiquité. Les premières traces d'utilisation du ciment remontent à environ 7000 avant J.-C., où des briques en argile étaient liées avec une sorte de boue, créant ainsi une forme primitive de ciment. Cependant, le ciment tel que nous le connaissons aujourd'hui a évolué au fil des siècles.

Les Romains ont joué un rôle crucial dans le développement du ciment. Ils ont utilisé un mélange de chaux et de cendres volcaniques pour créer un matériau de construction durable, connu sous le nom de "pozzolane", qui était utilisé dans la construction de structures telles que les aqueducs, les ponts et les amphithéâtres.

Au cours du XIXe siècle, le ciment Portland moderne a été développé en Angleterre. Joseph Aspdin a breveté le ciment Portland en 1824, en utilisant un mélange de calcaire et d'argile calcinés à haute température, produisant un ciment de haute qualité qui durcit rapidement. Ce nouveau type de ciment était beaucoup plus résistant que les ciments précédents et a rapidement gagné en popularité à travers le monde.

Depuis lors, la fabrication du ciment a connu de nombreuses innovations et améliorations technologiques. De nos jours, le processus de fabrication du ciment implique l'extraction de matières premières telles que le calcaire et l'argile, leur broyage et leur mélange dans des proportions spécifiques, puis leur cuisson à des températures élevées dans un four rotatif, suivie du broyage du clinker résultant pour obtenir le ciment final.[1]

Cependant, malgré ses avantages en termes de solidité et de durabilité, la fabrication du ciment est également associée à des préoccupations environnementales en raison de la consommation élevée d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre associées au processus de cuisson. C'est pourquoi il existe un intérêt croissant pour le développement de ciments alternatifs à faible impact environnemental, ainsi que pour des pratiques de fabrication plus durables.

I.3 FABRICATION DE CIMENT

La fabrication de ciment peut être schématiquement résumée en trois opérations principales:

1. Préparation du cru : Cette étape implique l'extraction et la préparation des matières premières telles que le calcaire, l'argile, le sable, le minerai de fer, etc., qui seront utilisées pour fabriquer le ciment. Ces matières premières sont généralement extraites de carrières et de mines, puis concassées, broyées et mélangées selon des proportions spécifiques pour former ce qu'on appelle le "cru" ou le "mélange cru".
 2. Cuisson : Le cru est ensuite introduit dans un four rotatif à haute température (environ 1450°C) pour subir une réaction chimique appelée "cuisson". Pendant ce processus, les matières premières sont transformées en clinker, qui est un matériau dur et pierreux composé principalement de silicates de calcium. Cette étape est cruciale car elle détermine en grande partie les propriétés du ciment final.
 3. Broyage et conditionnement : Le clinker refroidi est ensuite broyé avec d'autres additifs tels que le gypse pour réguler le temps de prise, afin de produire le ciment final. Ce ciment est ensuite conditionné sous forme de sacs ou stocké en vrac pour une utilisation ultérieure dans la construction.
- Il existe quatre méthodes principales de fabrication du ciment, qui dépendent essentiellement des caractéristiques des matières premières utilisées :
1. Fabrication du ciment par voie humide : Cette méthode, la plus ancienne, implique la préparation d'une suspension liquide des matières premières qui est ensuite séchée et cuite dans un four.

2. Fabrication du ciment par voie semi-humide : Cette méthode dérive de la voie humide et implique également la préparation d'une suspension liquide, mais avec une teneur en eau moindre. Elle est ensuite séchée et cuite dans un four.
3. Fabrication du ciment par voie sèche : Cette méthode, la plus couramment utilisée, implique le broyage et le séchage préalables des matières premières avant leur introduction dans le four pour la cuisson.
4. Fabrication du ciment par voie demi-sèche : Cette méthode dérive de la voie sèche et implique le broyage préalable des matières premières, suivie d'une humidification partielle avant la cuisson dans le four.

Ces différentes méthodes offrent des avantages et des inconvénients en termes d'efficacité énergétique, de qualité du produit final et d'impact environnemental, ce qui peut influencer le choix de la méthode de fabrication dans une situation donnée.

Les ciments modernes reposent principalement sur un composé de base constitué de silicates et d'aluminates de calcium. Ce mélange résulte de la réaction entre la chaux (CaO) et des composés tels que la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et l'oxyde de fer (Fe_2O_3). Les roches calcaires fournissent la chaux nécessaire, tandis que les argiles apportent l'alumine, la silice et l'oxyde de fer.[2]

Dans la nature, ces matériaux se trouvent sous forme de calcaire, d'argile ou de marne. En plus des oxydes mentionnés, ils peuvent contenir d'autres éléments, notamment l'oxyde ferrique (Fe_2O_3). Ce processus de combinaison des composants de base sous l'effet de la chaleur dans le four crée les composés essentiels qui confèrent aux ciments modernes leurs propriétés physiques et chimiques uniques, les rendant indispensables dans de nombreux domaines de la construction.

I.3.1 Le principe de la fabrication du ciment

La fabrication du ciment implique deux étapes cruciales : l'extraction et la transformation des matières premières, notamment le calcaire et l'argile. Tout d'abord, ces matériaux sont extraits des carrières, puis broyés et mélangés pour assurer une composition homogène. Ensuite, le mélange est chauffé à des températures extrêmement élevées, atteignant environ 1450°C dans un four rotatif. Ce processus entraîne d'abord l'évaporation de l'eau présente, puis la libération de composés tels que le dioxyde de carbone (CO_2) et la chaux (CaO) à partir du calcaire.[2] À des températures encore plus élevées, d'autres réactions se produisent, conduisant à la formation de différents composés comme les silicates bicarbonates et tricalciques. Le produit final, le clinker, est obtenu après un refroidissement rapide, appelé la

Chapitre I : Synthèse bibliographique

trempe. Cette méthode de fabrication est illustrée dans la figure ci-dessous (**Fig. I-1**), montrant les deux approches principales : la voie sèche et la voie humide.[3]

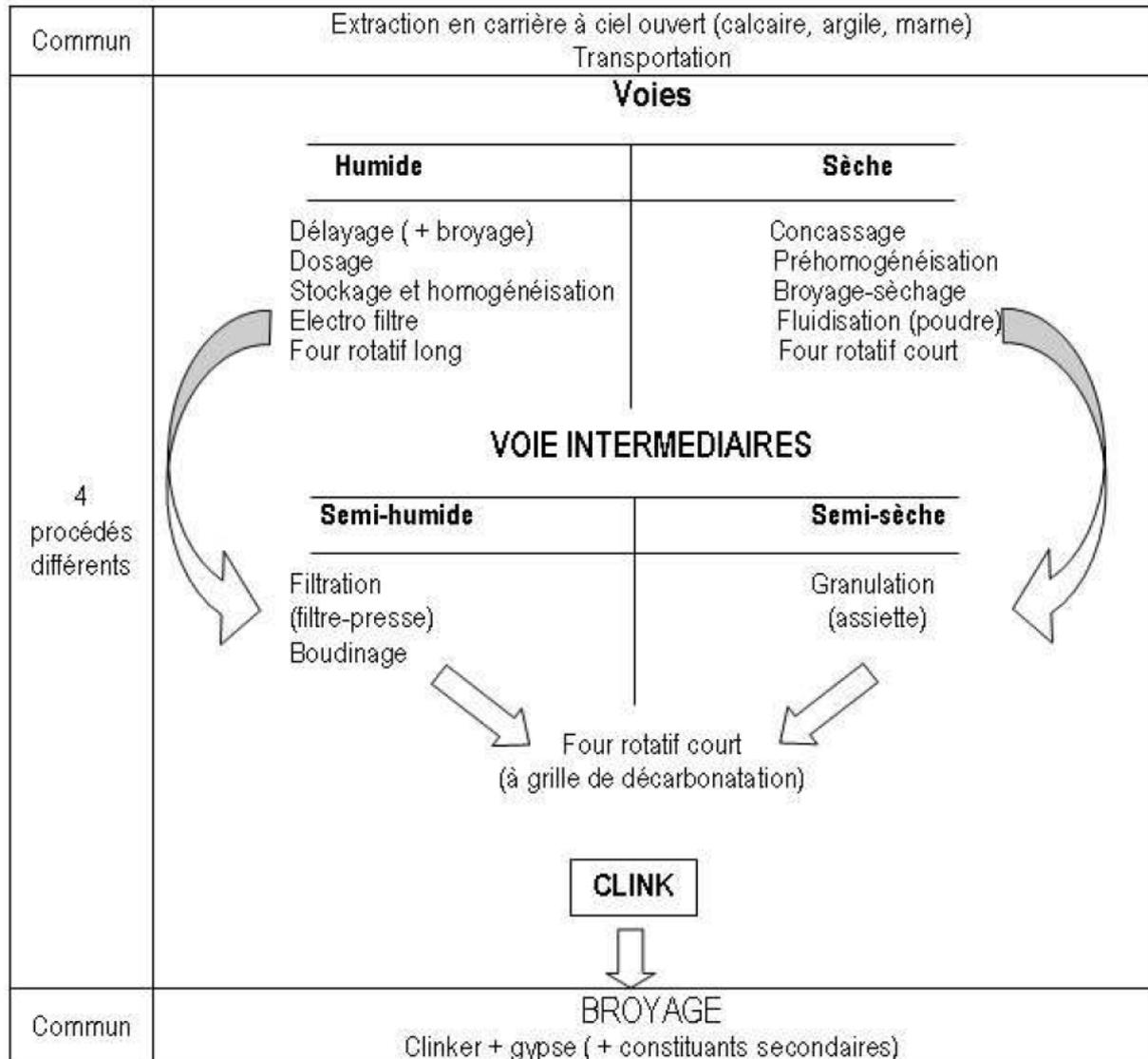


Fig. I-1. Le schéma de la fabrication du ciment

En Algérie, en raison des importantes demandes en eau et en énergie associées à la fabrication du ciment par voie humide, l'industrie cimentière a adopté principalement la méthode de fabrication par voie sèche. Cette décision vise à réduire la consommation de ces ressources tout en optimisant l'efficacité de la production. En privilégiant la voie sèche, les entreprises cimentières peuvent ainsi mieux gérer leurs coûts tout en adoptant une approche plus durable sur le plan environnemental.

➤ **Fabrication par voie sèche**

- Les ciments ordinaires sont élaborés à partir d'un mélange contenant principalement du calcaire (environ 80% de CaCO_3) et de l'argile (environ 20% de $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$). Selon l'origine des matières premières, ce mélange peut être ajusté en y ajoutant de la bauxite, de l'oxyde de fer ou d'autres matériaux pour obtenir les proportions adéquates d'alumine et de silice nécessaires.

Une fois réduit en une fine poudre, le mélange est acheminé depuis le silo d'homogénéisation jusqu'au four, soit par pompage, soit par aérogليسeur. Dans l'industrie du ciment par voie sèche, les fours sont généralement constitués de deux parties distinctes :

- Un préchauffeur vertical fixe doté de cyclones échangeurs de chaleur.
- Un four rotatif.

Les gaz chauds provenant du préchauffeur réchauffent la poudre crue circulant dans les cyclones en sens inverse, principalement grâce à la gravité. Ce procédé permet d'augmenter la température de la poudre jusqu'à environ 800°C , provoquant la libération du gaz carbonique (CO_2) et de l'eau. Par la suite, la poudre chauffée est introduite dans un four rotatif, similaire à celui utilisé dans la méthode humide, mais de taille considérablement réduite.

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

La possible séparation entre l'argile et le calcaire dans les préchauffeurs est un défi potentiel, mais dans le processus de fabrication du ciment, ce problème est généralement évité. Cela est dû au fait que l'argile et le calcaire ont des densités similaires, ce qui empêche leur ségrégation. De plus, les équipements sont spécialement conçus pour garantir une distribution homogène des matériaux et des mesures de précaution sont prises pour maintenir cette homogénéité.[2]

Un autre défi majeur est celui des poussières. En raison des réglementations strictes sur les émissions de particules, les cimenteries doivent investir dans des dépoussiéreurs, qui sont des dispositifs coûteux mais efficaces. Ces dépoussiéreurs utilisent des grilles de fils métalliques maintenus à haute tension pour capturer les particules de poussière, assurant ainsi des émissions réduites.

Enfin, maintenir l'homogénéité du mélange de matières premières est crucial. Cela est souvent réalisé en pré-homogénéisant les matières premières avant de les mélanger davantage dans le processus de fabrication. Cette étape garantit une composition uniforme

Chapitre I : Synthèse bibliographique

du mélange cru, ce qui est essentiel pour obtenir des propriétés cohérentes dans le ciment final.

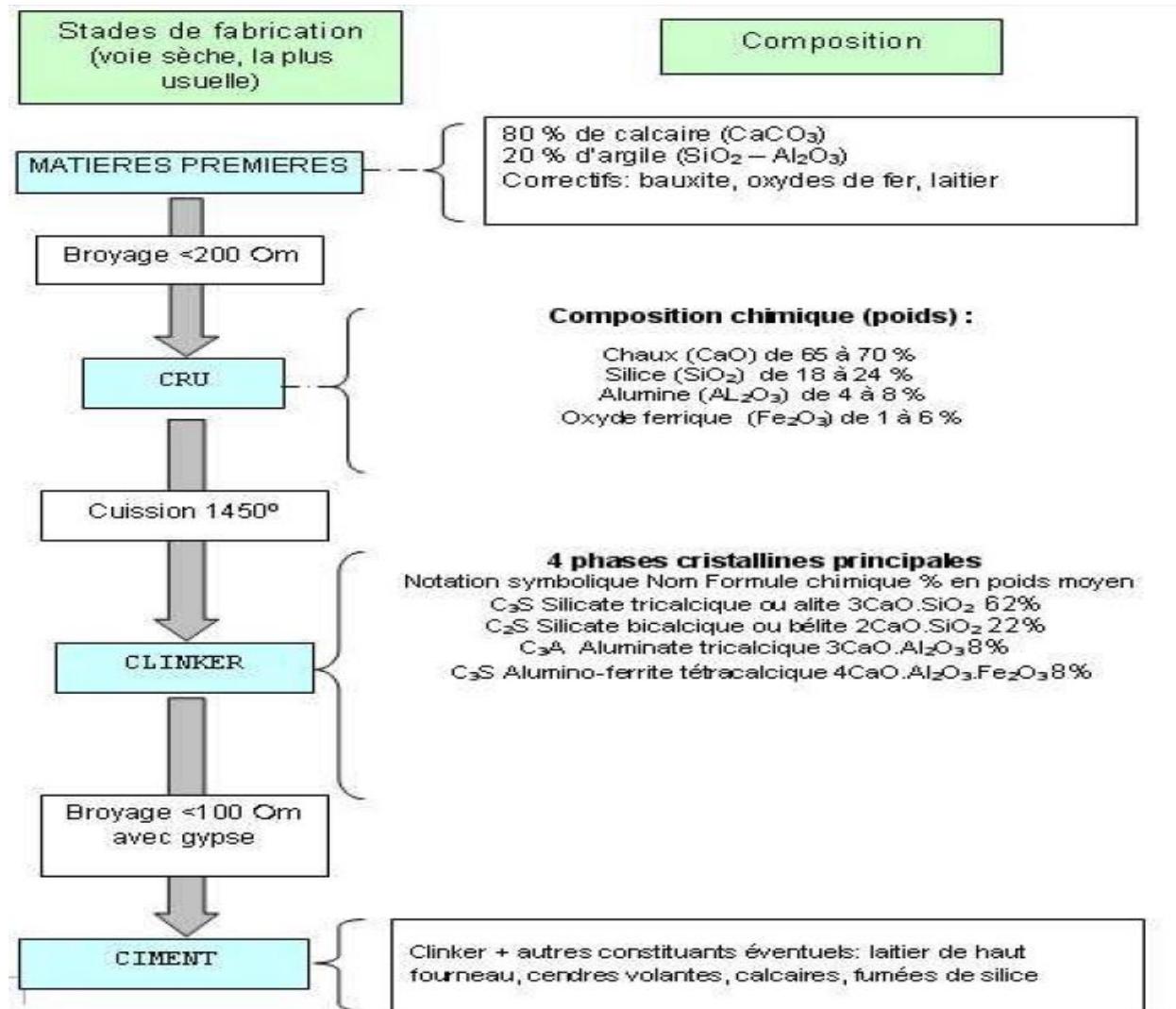


Fig. I-2. Les processus de fabrication du ciment par voie sèche suivant plusieurs étapes clés la transformation des matières premières en produits finals [3]

I.3.2 Constituants principaux et additions

I.3.2.1 Le clinker

Le clinker, résultant de la cuisson des matières premières telles que le calcaire, l'argile et parfois la marne, est le produit final des fours de fabrication de ciment. Ces matières premières contiennent des composants essentiels tels que la chaux (CaO), la silice (SiO_2) et l'alumine (Al_2O_3), nécessaires à la formation du clinker. Typiquement, ces matières

Chapitre I : Synthèse bibliographique

premières sont extraites de carrières naturelles, telles que des gisements de calcaire, d'argile ou de marne.

Le clinker, une fois broyé et associé à un peu de sulfate de chaux (gypse) pour régulation, donne naissance aux ciments Portland, largement utilisés dans le domaine de la construction.

Les éléments constitutifs de base tels que le CaO, le SiO₂, l'Al₂O₃ et le Fe₂O₃ interagissent pour former les différents constituants minéraux nécessaires, comme illustré dans la **Fig. I-3**.

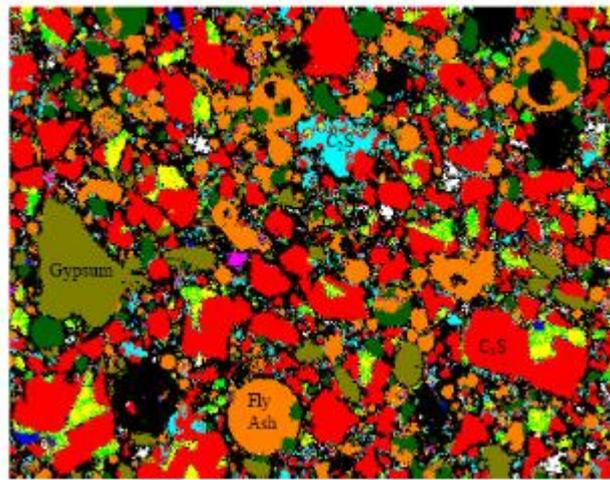


Fig. I-3. Microphotographie d'un clinker

Noir = porosité, rouge = C3S, bleu clair = C2S, vert = C3A, vert foncé = sulfate de calcium,

Jaune = K₂SO₄ et blanc = CaO

- Silicate tricalcique (C3S) : 3CaO.SiO₂ (Alite).
- Silicate bicalcique (C2S): 2CaO.SiO₂ (Belite).
- Aluminate tricalcique (C3A) : 3CaO.Al₂O₃.
- Ferro aluminate calcique (C4AF): 4CaO. Al₂O₃. Fe₂O₃ (Célite) [3].

I.3.2.2 Le gypse (CaSO₄)

Le gypse est une roche blanche, d'aspect mat, finement cristallin, tendre (pouvant être rayé à l'ongle) et possédant une densité de 2.3 kg/L. Il présente parfois quelques traces jaunes de soufre. Principalement composé de sulfate de calcium hydraté (CaSO₄. 2(H₂O)), le gypse est généralement très pur, souvent à hauteur de 98 %, et ne nécessite pas de purification lors de son exploitation.

D'un point de vue chimique, on classe cette roche dans les sels. Le gypse est une forme naturelle hydratée du sulfate de calcium (CaSO_4), qui se forme par dépôts de roches sédimentaires. Il peut également être synthétisé en laboratoire [4].

I.4 CARACTERISTIQUES ET EMPLOIS DES CIMENTS

L'industrie cimentière offre aujourd'hui une vaste gamme de ciments avec des caractéristiques spécifiques adaptées à divers domaines d'application. Ces ciments présentent une variété de compositions, de résistances, de temps de prise et de durcissement, répondant ainsi aux besoins variés de la construction, que ce soit sur les chantiers ou en usine, pour des bâtiments ou des ouvrages de génie civil.

Les exigences climatiques et la résistance face à des agents agressifs sont des paramètres cruciaux qui influencent le choix du ciment approprié. Il est donc important de comprendre les caractéristiques spécifiques des différents types de ciments normalisés afin de faire le choix le plus adapté à chaque projet.

Les ciments offrent une large gamme de résistances pour la fabrication de bétons aux performances variées. Par exemple, à partir de ciments CEM I 42,5 ou 52,5, il est possible de produire des Bétons à Hautes Performances dépassant une résistance à la compression de 100 MPa.

Ce chapitre vise à présenter les limites de composition de chaque type de ciment ainsi que les valeurs limites de résistance pour chaque classe. Les domaines d'application découlant de ces propriétés sont ensuite décrits, de même que les particularités liées à leur mise en œuvre ou aux précautions d'utilisation.

Les ciments, qui sont des mélanges de clinker et d'autres constituants, sont catégorisés selon leur composition en cinq principaux types selon les normes NF P 15-301[1]. Ils sont identifiés par la notation CEM, suivie de numéros romains de I à V, avec leur équivalent français entre parenthèses :

- CEM I: Ciment Portland (CPA).
- CEM II : Ciment Portland Composé (CPJ).
- CEM III : Ciment de Haut Fourneau (CHF).
- CEM IV : Ciment Pouzzolanique (CPZ).
- CEM V : Ciment au Laitier et aux Cendres (CLC).

Chapitre I : Synthèse bibliographique

Cette classification permet de différencier les types de ciments en fonction de leur composition et de leurs caractéristiques, facilitant ainsi le choix du ciment le mieux adapté à chaque usage dans le domaine de la construction [1].

Tab. I-1. Différents types de ciments courants [6]

<i>Types de ciment</i>	<i>Teneur en clinker K (%)</i>	<i>Teneur de l'un de constituants (%) suivants :</i> -Laitier pouzzolanes -Cendres -calcaires -schistes -fumées de silice	<i>Teneur en constituants secondaires (filler) (%)</i>
CEM1 CEMENT PORTLAND	95 à 100	0%	0 à 5 %
CEM2 CIMENT PORTLAND COMPOSE	65 à 94	De 6 à 20 % de l'un des constituants, sauf dans les cas où le constituant est de la fumée de silice auquel la proportion est limitée à 10 %. De 21 à 35 % avec les mêmes restrictions que ci-dessus	0 à 5 %
CEM3 CIMENT DE HAUT FOURNEAU	5 à 64	De 35 à 65 % de laitier de haut fourneau de 66 à 80 % de laitier de haut fourneau de 81 à 95 % de laitier de haut fourneau	0 à 5 %
CEM4 CIMENT POUZZOLANIQUE	45 à 89	De 10 à 35 % de pouzzolanes, cendres siliceuses ou fumées de silice, ces dernières étant limitées à 10 %. De 36 à 55 % comme ci-dessus	0 à 5 %
CEM5 CIMENT COMPOSE	20 à 64	De 18 à 30 % de laitier de haut fourneau de 18 à 30 % de cendres siliceuses ou de pouzzolanes. De 31 à 50 % de chacun des 2 constituants comme ci-dessus	0 à 5 %

I.5 HYDRATATION DU CIMENT PORTLAND

I.5.1 Introduction

Dans le processus de durcissement du ciment, l'hydratation est une étape fondamentale qui permet la formation de liaisons chimiques et la consolidation de la structure. Cependant, pour que ce processus puisse se dérouler efficacement, il est impératif que l'eau puisse se diffuser à travers les pores du gel formé. Si le réseau poreux est fermé, une partie du ciment reste inatteignable et ne peut donc pas être hydratée. Cette situation entraîne une diminution de la chaleur générée par l'hydratation, ce qui peut compromettre la progression et la qualité globale du durcissement du ciment. Ainsi, comprendre l'importance de la diffusion de l'eau à travers les pores du gel est essentiel pour garantir un durcissement homogène et efficace du ciment [5].

- Les hydrates (C-S-H, Ca (OH)₂ et les sulfo-aluminates) ;
- Des grains de ciment non hydraté ;
- Des espaces capillaires ;
- Des bulles d'air.

I.5.2 Mécanismes d'hydratation d'un ciment Portland

L'hydratation du ciment Portland est un processus complexe impliquant la réaction des quatre phases minérales qui le composent. Parmi ces phases, le C3S (trisilicate de calcium) constitue la principale composante du ciment. Ainsi, c'est l'hydratation du C3S qui exerce un contrôle majeur sur la cinétique globale de l'hydratation. Cependant, il est important de noter qu'il existe une synergie entre les différentes réactions qui se produisent pendant l'hydratation du ciment. En d'autres termes, bien que l'hydratation du C3S soit prépondérante, les autres phases minérales interagissent également et influent sur le processus global d'hydratation. Cette interconnexion entre les réactions minérales contribue à la complexité et à la dynamique de l'hydratation du ciment Portland. [5] (voir la Fig.I-4).

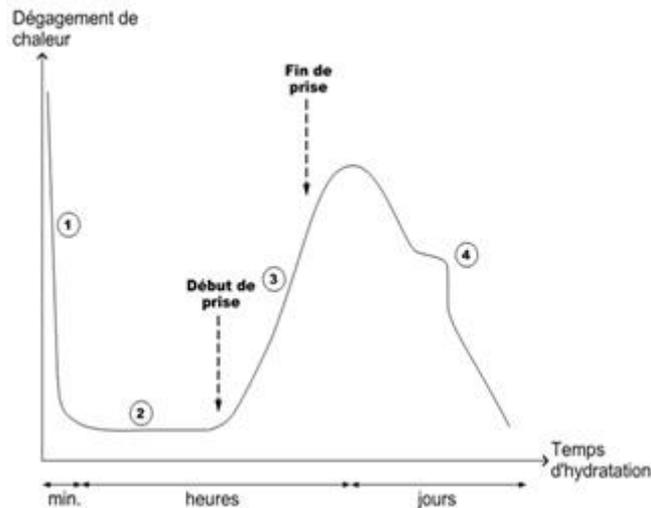


Fig. I-4. Courbe caractéristique de la calorimétrie isothermique d'un ciment découpé en quatre périodes [5]

I.5.3 Hydratation des silicates

Lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau, les silicates tricalciques (Ca_3SiO_5) et les silicates bicalciques (Ca_2SiO_4) se dissolvent pour former des ions, qui réagissent ensuite pour produire des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Ces réactions, exothermiques, agissent comme des catalyseurs pour le processus d'hydratation. Cependant, l'hydratation du C2S est plus lente, ce qui entraîne une formation plus réduite de portlandite.

Les C-S-H, ayant une composition variable, se comportent comme un gel non cristallin. En s'entrelaçant, ils renforcent la structure du ciment en recouvrant les grains non hydratés et en remplissant progressivement les espaces entre les grains. Après quelques heures, la couche d'hydrates qui entoure les grains de ciment devient suffisamment dense pour ralentir la pénétration des ions et de l'eau vers les parties non hydratées du système. Par conséquent, le taux d'hydratation diminue progressivement, mais peut se poursuivre pendant des mois, voire des années [6].

I.5.4 Hydratation des aluminates

L'hydratation des aluminates est un processus essentiel dans la formation et le durcissement du ciment. Cette réaction se produit principalement avec les phases minérales telles que la tricalcium aluminate (C3A) présente dans le ciment Portland [5].

Le processus d'hydratation des aluminates se déroule en plusieurs étapes :

1. **Activation initiale** : Lorsque les aluminates entrent en contact avec l'eau, ils réagissent rapidement pour former des ions aluminates et des ions hydroxydes.

2. **Formation de l'ettringite** : Les ions aluminates réagissent ensuite avec les ions sulfate présents dans le ciment pour former de l'ettringite (sulfate de calcium et d'aluminium hydraté), une réaction qui se produit généralement dans les premières heures après le mélange du ciment avec de l'eau. Cette réaction est importante pour le développement précoce de la résistance dans le ciment.
3. **Maturation et formation de produits finaux** : Au fil du temps, l'ettringite peut se transformer en d'autres hydrates de calcium et d'aluminium, tels que le monosulfate de calcium hydraté (CSH) et le sulfate de calcium hydraté (CSH). Ces produits finaux contribuent à renforcer la structure du ciment et à améliorer sa durabilité.
4. **Contributions à la résistance et à la durabilité** : L'hydratation des aluminates contribue significativement à la résistance initiale du ciment ainsi qu'à sa résistance à long terme et à sa durabilité dans des environnements divers.

I.5.5 Conclusion

En bref, l'hydratation du ciment Portland est un processus complexe et crucial qui détermine en grande partie les propriétés mécaniques, la durabilité et la performance globale du matériau dans diverses applications de construction. Ce processus implique la réaction des différentes phases minérales présentes dans le ciment avec l'eau, aboutissant à la formation de nouveaux hydrates et à la consolidation de la structure.

L'hydratation du ciment Portland est principalement contrôlée par les réactions d'hydratation du tricalcium silicate (C3S) et du dicalcium silicate (C2S), qui sont les composants principaux du ciment. Ces réactions produisent des silicates de calcium hydratés (C-S-H), de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et d'autres composés hydratés, qui renforcent la matrice cimentaire et contribuent à sa résistance.

Il est important de noter que l'hydratation du ciment Portland est influencée par divers facteurs tels que la composition du ciment, le rapport eau-ciment, la température et l'humidité environnantes. Une compréhension approfondie de ces facteurs est essentielle pour contrôler et optimiser le processus d'hydratation afin d'obtenir des performances optimales du matériau dans des conditions spécifiques.

En somme, l'hydratation du ciment Portland est un processus dynamique et continu qui continue de se dérouler même après le durcissement initial du matériau. Une gestion efficace de ce processus est cruciale pour assurer la qualité et la durabilité des structures en béton dans le domaine de la construction.

I.6 LES AJOUTS MINÉRAUX

L'utilisation exclusive de ciment Portland dans la fabrication de béton est une pratique répandue, mais la substitution partielle du ciment par des ajouts minéraux présente plusieurs avantages potentiels. Outre les considérations économiques, cette substitution peut influencer positivement les propriétés rhéologiques du béton, lui conférant une meilleure maniabilité et une meilleure capacité de mise en œuvre. De plus, elle peut améliorer les propriétés de résistance et de durabilité du matériau, offrant ainsi des performances accrues dans divers environnements et applications.

La plupart des ajouts minéraux possèdent une caractéristique commune : leur contenu en silice vitreuse réactive. Cette silice, lorsqu'elle entre en contact avec l'eau, réagit avec la chaux libérée pendant l'hydratation des phases C2S et C3S du ciment Portland. Cette réaction produit des silicates de calcium hydratés, similaires à ceux formés lors de l'hydratation du ciment Portland lui-même. Ainsi, l'ajout d'ajouts minéraux peut induire une réaction pouzzolanique, contribuant à la formation d'une matrice cimentaire plus dense et plus durable.

En conséquence, la substitution partielle du ciment par des ajouts minéraux peut être bénéfique à plusieurs égards, tant sur le plan technique que sur le plan économique. Elle permet d'exploiter les caractéristiques réactives des ajouts minéraux pour améliorer les performances du béton tout en réduisant potentiellement les coûts de production. Cette approche offre ainsi une solution polyvalente et durable pour la fabrication de bétons répondant aux exigences diverses des projets de construction.

I.6.1 Introduction

Pouzzolane + chaux + eau Silicate de calcium hydraté Il faut noter qu'à la température de la pièce, cette réaction est généralement lente et peut se développer sur plusieurs semaines. Cependant plus la pouzzolane est fine et vitreuse, plus sa réaction avec la chaux est rapide.

L'hydratation du ciment Portland libère une grande quantité de chaux par suite de la réaction d'hydratation du C 2 S et du C3 S (30 % de la masse anhydre du ciment). Cette chaux contribue à la chute de résistance de la pâte de ciment hydratée. Elle peut même être responsable des problèmes de durabilité puisqu'elle peut être assez facilement lessivée par de l'eau, ce lessivage augmente alors la porosité de la pâte de ciment. Le seul aspect positif de la présence de chaux dans un béton est qu'elle maintient un pH élevé qui favorise la stabilité de la couche de l'oxyde de fer que l'on retrouve sur les armatures d'acier.

Quand on fabrique des bétons, si on utilise 20 à 30% de pouzzolane, théoriquement, on pourrait faire réagir toute la chaux produite par l'hydratation du ciment portland pour la

transformer en C-S-H. Cependant, les conditions dans lesquelles on utilise le béton sont très différentes de cette situation idéale et la réaction pouzzolanique n'est jamais complète. Ces matériaux étant des sous-produits industriels, leurs compositions chimiques sont en général moins bien définies que celle du ciment Portland [6].

I.6.2 Classification des ajouts minéraux

Les ajouts minéraux utilisés dans la fabrication du béton sont généralement classés en deux catégories principales : actifs et inertes. Les ajouts actifs sont ceux qui possèdent des propriétés réactives, telles que la capacité à participer activement aux réactions chimiques pendant l'hydratation du ciment. À l'opposé, les ajouts inertes sont des matériaux qui ne réagissent pas chimiquement avec le ciment, mais qui peuvent néanmoins influencer certaines propriétés du béton, telles que la finesse de la texture ou la stabilité du mélange.

Par ailleurs, les ajouts minéraux peuvent être classés en deux catégories basées sur leur origine : naturelle ou artificielle. Les ajouts naturels sont des matériaux extraits de sources naturelles, tels que des minéraux volcaniques, des cendres de combustion ou des argiles spécifiques. En revanche, les ajouts artificiels sont des matériaux produits par des processus industriels, tels que les fumées de silice, les cendres volantes issues des centrales thermiques, ou les laitiers de hauts-fourneaux.

Cette classification permet aux ingénieurs et aux professionnels de la construction de sélectionner les ajouts minéraux les plus appropriés en fonction des besoins spécifiques du projet et des propriétés recherchées pour le béton. En comprenant les caractéristiques et les réactions des différents types d'ajouts, il est possible d'optimiser la formulation du béton pour atteindre les performances désirées tout en tenant compte des contraintes économiques et environnementales.

I.6.3 Les ajouts minéraux actifs

Parmi les ajouts actifs on peut citer :

- Les argiles cuites (déchets de briques et de tuiles).
- Le laitier de haut fourneau.
- La fume de silice
- La pouzzolane
- Filler calcaire
- Cendre volante
- Les adjuvants
- La bentonite

- **Les argiles cuites**

Les argiles cuites se présentent généralement sous forme de poudre fine, obtenue après le broyage d'argiles riches en kaolinite ($Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$), qui ont été spécialement chauffées à des températures comprises entre 600 et 800°C. Ce traitement thermique altère la structure de la kaolinite en éliminant l'eau de cristallisation et en induisant des modifications moléculaires. Le produit final est une poudre finement broyée, souvent désignée sous le nom d'argile calcinée, qui présente des caractéristiques chimiques et physiques distinctes, la rendant appropriée à diverses applications industrielles, notamment dans les secteurs de la construction et de la céramique.

- **Les laitiers 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.

En Europe, les laitiers sont en général ajoutés au ciment. On parle de ciment au laitier. En Amérique du nord, ils sont incorporés directement dans le béton.

- **Les fumées de silice**

Ce 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 μm . la surface spécifique varie de 20 à 25 m^2/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, physicochimique 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 aux fumées de silice tout à fait imperméable. L'action pouzzolanique 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.

- **La pouzzolane :**

La pouzzolane naturelle, dans son acception stricte, fait référence aux pyroclastites, ces matériaux éruptifs projetés lors des éruptions volcaniques (Meukam, 2004). Elles se caractérisent par leur composition principalement constituée de silice (SiO_2) et d'alumine (Al_2O_3), avec des traces d'oxyde de fer et d'autres oxydes, ainsi qu'une proportion variable de chaux (CaO). Leur couleur varie généralement du rouge au noir, avec des nuances intermédiaires, et exceptionnellement grise. Les pouzzolanes les plus acides, riches en silice et en faible teneur en chaux, tendent à être plus vitreuses, nécessitant une différence SiO_2 - CaO supérieure à 34% pour une appréciable teneur en verre (Vernet, 1991).

Bien qu'elles ne possèdent pas de propriétés liantes entre elles, les pouzzolanes réagissent avec la chaux en présence d'eau à température ambiante pour former des composés insolubles stables dotés de propriétés liantes (Meatf, 1977). Cette réaction produit du silicate de calcium hydraté, renforçant ainsi la structure du béton. Les avantages du remplacement partiel du ciment par des matériaux pouzzolaniques sont nombreux. Outre le renforcement de la résistance aux attaques chimiques et à la durabilité du béton, cela permet également de réduire les réactions alcalin-agrégats et le retrait au séchage. De plus, cette pratique permet de diminuer la quantité de clinker nécessaire dans la composition du ciment, contribuant ainsi à des pratiques de construction plus durables et respectueuses de l'environnement. Les ciments contenant des pouzzolanes sont obtenus en mélangeant des produits pouzzolaniques finement broyés avec du ciment Portland.

I.6.4 Ajouts minéraux inertes

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

En outre, les particules les plus fines d'un ajout inerte servent à remplir les pores de la pâte de ciment, ils jouent le rôle de micro agrégats (**Larrard 2002**),

Ce sont des matériaux quasiment inertes, organiques naturels ou synthétiques spécialement sélectionnés qui, par leur composition granulométrique améliorent les propriétés physiques du ciment portland et le béton (ouvrabilité, pouvoir de rétention d'eau et durabilité)

(Gegout1 1986, Gegout2 1986). Parmi ces additifs on distingue les fillers de marbre et la poussière.

Les roches carbonatées telle que le calcaire, craie, dolomie, sont largement utilisées comme ajouts naturels inertes au ciment.

La priorité est accordée aux roches les plus dures pour éviter un éventuel colmatage de la matière lors du broyage.

- **Fillers de calcaire :**

Un filler est une fine minérale obtenue par broyage d'une roche calcaire de manière à répondre aux critères de conformité de la norme sur les additions minérales calcaires **(NF P18-508)**. L'appellation « filler » vient du fait que cette addition, si elle est broyée assez finement, s'insère dans le squelette granulaire du ciment et permet donc de combler les vides entre les autres particules de dimensions plus importantes du béton (ciment, granulats). L'effet, appelé effet filler, se traduit par une compacité plus importante du squelette granulaire et va donc avoir des effets sur les propriétés aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci [7].

- **La bentonite**

En 1898, le terme "bentonite" fut introduit pour désigner une argile au toucher savonneux, découverte dans la formation géologique du "Benton shale," située près de Rock River, dans le Wyoming, aux États-Unis. La première exploitation de cette argile remonte à 1890. La formation géologique doit son nom à Fort Benton, situé à environ 650 km au nord de Rock River.

Les bentonites, identifiées comme des silicates d'alumine hydratés, appartiennent au groupe des montmorillonites, une classe de minéraux largement étudiée pour ses propriétés absorbantes. La Pharmacopée Européenne de 2008 décrit la bentonite comme une argile naturelle, riche en montmorillonite, un silicate d'aluminium hydraté dont la composition peut inclure des atomes de magnésium et de fer en remplacement partiel de l'aluminium et du silicium.

Cette argile, utilisée depuis longtemps pour ses propriétés uniques, a marqué un tournant dans l'industrie des minéraux grâce à sa polyvalence et à sa large gamme d'applications [9].

➤ **Types de bentonite :**

● **Il existe trois types de bentonites :**

1. Bentonite calcique

La bentonite calcique est le type le plus courant et représente la majeure partie des gisements exploités dans le monde. Elle contient principalement des ions calcium (Ca^{2+}) en position inter foliaire. En raison de cette composition, ces argiles ont la capacité de gonfler de 3 à 7 fois leur volume initial lorsqu'elles sont en contact avec l'eau.

2. Bentonite sodique

Les bentonites sodiques sont plus rares et se distinguent par la présence d'ions sodium (Na^+) comme ions inter foliaires ou échangeables. Elles ont un pouvoir de gonflement beaucoup plus élevé que les bentonites calciques, avec une capacité de gonflement allant de 12 à 18 fois leur volume initial.

3. Bentonite de potassium :

Également connue sous les noms de bentonite de potasse ou K-bentonite, cette variété d'argile est riche en potassium. Elle se forme à partir de l'altération des cendres volcaniques et est caractérisée par sa composition illitique, ce qui influence ses propriétés spécifiques.

➤ **Utilisations de la bentonite**

La bentonite est largement appréciée dans divers domaines en raison de ses propriétés uniques, principalement attribuées à sa composante principale, la montmorillonite. Cette argile possède une capacité élevée d'absorption et de gonflement, ce qui la rend utile dans plusieurs secteurs :

- 1. Agroalimentaire :** Utilisée dans divers processus de traitement et de purification des produits alimentaires.
- 2. Décoloration des huiles :** Employée pour éliminer les impuretés et améliorer la clarté des huiles comestibles.
- 3. Raffinage du pétrole :** Utilisée pour le traitement et la purification des produits pétroliers.
- 4. Fabrication du papier :** Ajoutée pour améliorer la qualité du papier et contrôler les propriétés de l'encre.
- 5. Génie civil :** Employée comme additif dans le ciment pour renforcer les structures.

6. **Traitement des eaux usées** : Utilisée pour éliminer les contaminants et améliorer la qualité de l'eau.
7. **Pharmacie et cosmétique** : Utilisée comme excipient dans les formulations pharmaceutiques et cosmétiques, ainsi que pour le transport et la libération contrôlée d'ingrédients actifs.

Ainsi, la bentonite joue un rôle crucial dans une multitude d'applications industrielles et environnementales grâce à ses caractéristiques uniques de gonflement et d'absorption.

➤ **L'activité de la bentonite avec le ciment**

L'interaction de la bentonite avec le ciment est un sujet important dans le domaine de la construction et de l'ingénierie. Voici comment cette interaction fonctionne :

1. **Agent d'expansion dans le ciment** : Lorsque la bentonite est ajoutée au ciment, elle agit comme un agent d'expansion. En absorbant l'eau présente dans le mélange, la bentonite se gonfle, ce qui augmente le volume du mélange de ciment. Cela peut être utile pour compenser le retrait du ciment pendant le durcissement, ce qui aide à réduire les fissures et à améliorer la durabilité de la structure.
2. **Amélioration des propriétés mécaniques** : La bentonite peut également améliorer les propriétés mécaniques du ciment. En raison de sa structure argileuse, elle agit comme un renfort dans le mélange de ciment, renforçant ainsi la résistance et la stabilité de la structure finale.
3. **Réduction de la perméabilité** : L'ajout de bentonite au ciment peut également contribuer à réduire la perméabilité du matériau. En se gonflant et en remplissant les vides et les pores dans le mélange de ciment, la bentonite crée une barrière étanche, ce qui peut être particulièrement bénéfique dans les applications nécessitant une résistance à l'eau ou une protection contre la corrosion.

I.6.5 Les adjuvants

Les adjuvants, également connus sous le nom d'additifs pour béton, sont des produits chimiques ou des matériaux ajoutés au béton lors de sa fabrication pour améliorer certaines de ses propriétés ou pour faciliter son processus de production. Ces produits peuvent avoir divers effets, tels que la modification du temps de prise, l'augmentation de la plasticité, la réduction de la perméabilité, l'amélioration de la résistance ou la réduction de la quantité d'eau nécessaire.

Il existe différents types d'adjuvants pour béton, chacun ayant des fonctions spécifiques. Parmi les adjuvants couramment utilisés, on trouve les plastifiants, les superplastifiants, les

Chapitre I : Synthèse bibliographique

retardateurs de prise, les accélérateurs de prise, les agents de rétention d'eau, les entraîneurs d'air, les stabilisateurs de mousse, les agents de coloration, et les agents de protection contre le gel et le dégel.

Les adjuvants sont largement utilisés dans l'industrie du béton pour améliorer les performances et la durabilité des structures en béton, ainsi que pour optimiser les processus de production et réduire les coûts. Ils sont souvent choisis en fonction des exigences spécifiques du projet de construction et des conditions environnementales [8].

ADJUVANTS	DOSAGE EN %
Plastifiants	0,15 à 1,2
Superplastifiants	0,6 à 2,5
Accélérateurs de prise	1 à 3
Accélérateurs de durcissement	0,8 à 2
Retardateurs de prise	0,2 à 0,8
Hydrofuges	0,5 à 2
Entraîneurs d'air	0,05 à 3
Rétenteurs d'eau	0,1 à 2

Tab. I-2. Dosage en adjuvants par rapport au poids du ciment [8]

I.6.5.1 Les 3 grandes catégories d'adjuvants

- a) Les adjuvants qui modifient l'ouvrabilité du béton :
 - Plastifiants réducteurs d'eau
 - Superplastifiants hauts réducteurs d'eau
- b) Les adjuvants qui modifient la prise et le durcissement :
 - Accélérateurs de prise
 - Accélérateurs de durcissement
 - Retardateurs de prise
- c) Les adjuvants qui modifient certaines propriétés du béton :
 - Entraîneurs d'air
 - Hydrofuges de masse
 - Rétenteurs d'eau

I.6.5.2 Adjuvants modifiant l'ouvrabilité des bétons

Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité des bétons, également connus sous le nom de plastifiants ou de fluidifiants, sont des produits chimiques ajoutés au béton pour améliorer sa maniabilité ou sa fluidité sans nécessiter l'ajout d'eau supplémentaire. Ces adjuvants agissent en réduisant la viscosité du mélange de béton, ce qui facilite son étalement, sa mise en place et son compactage.

Les plastifiants sont généralement des polymères synthétiques ou des dérivés du lignosulfonate, qui agissent en dispersant les particules de ciment et en réduisant les forces d'attraction entre elles. Cela permet au béton d'avoir une meilleure capacité de coulée et d'adhérer plus efficacement aux armatures et aux surfaces de moules. De plus, l'utilisation de plastifiants peut aider à réduire les risques de ségrégation et d'exsudation du béton, ce qui contribue à obtenir une surface plus lisse et plus homogène.

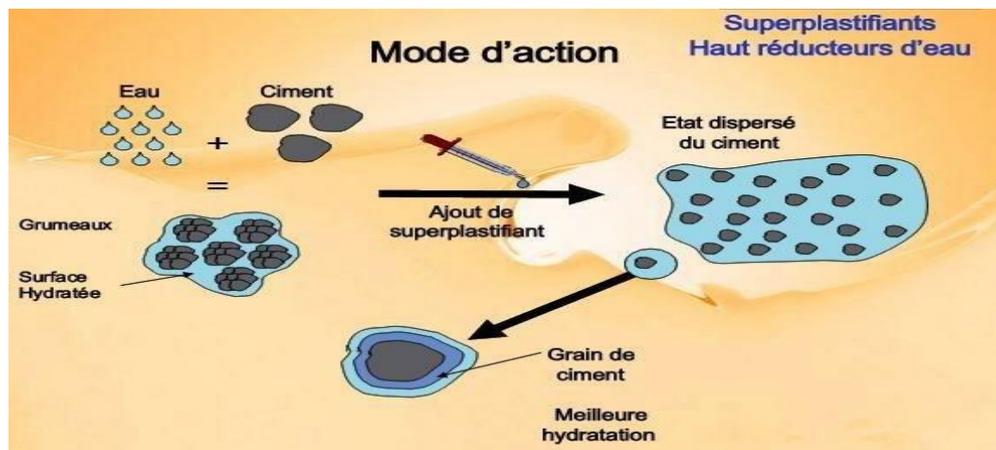


Fig. I-5. Mécanismes d'action des adjuvants superplastiques

Les adjuvants modifiant l'ouvrabilité sont largement utilisés dans la construction de structures en béton nécessitant un coulage facile et uniforme, telles que les dalles, les fondations, les murs et les poteaux. Leur utilisation permet d'améliorer l'efficacité du processus de construction en réduisant le temps de coulage et en facilitant le travail des ouvriers sur le chantier. En outre, ils peuvent également contribuer à améliorer la résistance et la durabilité du béton en réduisant la quantité d'eau nécessaire pour obtenir une consistance souhaitée, ce qui permet d'obtenir un béton plus compact et plus résistant [8].

I.7 MESURE DE RETRAIT

Le retrait de la pâte peut être défini comme la déformation d'une éprouvette (un échantillon) de pâte dans une ambiance thermodynamique constante. L'éprouvette testé en retrait doit

aussi être libre de toutes sollicitations mécaniques extérieures, ainsi on distingue le retrait dans une ambiance sèche et le gonflement dans une ambiance saturée.

La prédiction de cette déformation est d'une très grande importance pour l'étude de la durabilité et de l'aptitude au fonctionnement à long terme des structures en matériaux cimentaires. En effet, le retrait peut être à l'origine de la fissuration, de pertes de précontrainte, d'une redistribution des contraintes, et même, plus rarement, de la ruine de l'ouvrage [9]. Cette variation dimensionnelle dépend de plusieurs paramètres tels que la composition du matériau cimentaire testé, la qualité de ses constituants, la taille des éléments ainsi que les conditions extérieures de conservation. Le retrait de la pâte possède différentes origines d'où on peut distinguer les différents retraits qui caractérisent le séchage du matériau :

I.7.1 Retrait Endogène :

On appelle retrait endogène, le retrait provoqué par des phénomènes strictement internes au pâte, en absence de tout échange d'eau avec l'extérieur, c'est ce qu'on appelle en thermodynamique un système fermé [9] : Le retrait endogène est un phénomène propre à l'hydratation du ciment qui témoigne de son évolution et de la quantité des hydrates formés. Ce retrait est rapide et croit lorsque la quantité d'eau diminue, il s'achève (95 %) au bout de (1 à 4) semaines [9].

On distingue d'après l'évolution de la structure du matériau l'apparition de plusieurs phénomènes qui donnent au retrait endogène plusieurs formes de déformation d'où on présente les formes majeures qui le détermine.

- a) Retrait de serrage (Contraction Le Chatelier)
- b) Retrait thermique
- c) Retrait d'hydratation (auto-dessiccation)

I.7.2 Retrait Exogène :

Le retrait exogène représente la déformation des éprouvettes en présence d'un échange hydrique avec le milieu extérieur. Le retrait exogène se produit donc lorsque les surfaces de l'élément sont libres. Ceci provoque une perte d'eau à travers les pores de la pâte ce qui atteste de la qualité de la microstructure à conserver ou à perdre son humidité. Il est mesuré comme

Chapitre I : Synthèse bibliographique

la différence des retraits de deux éprouvettes l'une libre et l'autre isolée. Ces valeurs représentent la combinaison entre la dessiccation et la carbonatation qui témoignent de la porosité de la microstructure et sa capacité à favoriser le séchage.

a) Retrait de dessiccation

b) Retrait de carbonatation

- Mécanisme du retrait de dessiccation :

Le départ de l'eau présente initialement dans les pores de la pâte induit une déformation du squelette solide. Les expériences de retrait de dessiccation montrent que la distribution des pores et les caractéristiques du gel CSH ont une influence prépondérante sur la déformation de retrait de dessiccation. Les trois principaux mécanismes proposés pour les valeurs usuelles de l'humidité relative (plage 50-100 %) sont liés aux effets suivants [10] :

- Pression capillaire,
- Pression de disjonction,
- Variation de l'énergie surfacique solide.

I.7.3 Effets des additions minérales

En général, l'incorporation des additions minérales dans la composition de la pâte ou du béton entraîne une demande en eau supplémentaire, un volume de pâte plus important et une formation supplémentaire de produits CSH, ce qui engendre un retrait plus important. De même, la présence des ajouts est accompagnée par une modification de la microstructure et une augmentation du pourcentage des pores fins comme le cas de la fumée de silice [11] ; ce qui n'entraîne pas forcément un retrait important.

Dans une étude de synthèse, Mehta [12] reporte que le retrait des produits renfermant des mélanges de ciment Portland-pouzzolanes est généralement supérieur à celui du produit correspondant ne contenant que du ciment Portland. Car le retrait est attribué à la teneur en CSH laquelle serait relativement plus élevée dans le cas des mélanges de ciment Portland-pouzzolanes.

Les pâtes à la fumée de silice possèdent une structure des pores plus fins et par conséquent, retiennent plus d'eau condensée au niveau capillaire à une humidité relative donnée. A des taux d'humidité relative situés sous le niveau capillaire, les pertes de poids et de retrait sont

limitées par la quantité de CSH ; celle-ci étant plus grande dans les pâtes aux fumées de silice [13].

Lianyong et Yan [14] observent, sur trois bétons de rapport E/C égal à 0.26 et confectionnés avec un ciment ordinaire, 30 % de laitier et le troisième de 10% de fumée de silice et 30% de laitier, que le retrait de dessiccation est pratiquement identique au jeune âge, après 28 jours les valeurs commencent à se distinguer et à 180 jours le retrait atteint respectivement 220, 96 et 127 micromètres. Cette réduction est attribuée au grand nombre d'hydrates formés lors de la présence de substance minérale qui rend la pâte plus rigide et moins déformable.

De même, Khatri et al. [15] examinent le retrait d'un béton ayant un E/C égal à 0.35, les auteurs ont montré que la substitution de 10% de fumée de silice dans un ciment ordinaire augmente le retrait au jeune âge et réduit celui-ci à long terme. Cet effet est largement réduit lorsque la fumée de silice est substituée avec un ciment au laitier où la portlandite est moins disponible.

Par ailleurs, Mehta [13] confirme qu'aucune différence de retrait n'est observée sur des bétons comportant moins de 25% de cendres volantes et que cet écart en retrait des cendres volantes reste faible pour un taux de substitution inférieur à 20%. Par contre, lors de la présence de 50% de laitier le retrait est largement supérieur. Les mesures effectuées par Chen et Chan [17] sur des éprouvettes de pâte contenant 35% de laitier présentent un retrait supérieur à celui d'un pâte témoin, cet important retrait provoque des autocontraintes de traction et une fissuration de peau ce qui explique les chutes de résistance lors d'une forte présence de laitier. Quant à la fumée de silice, les résultats de retrait sont peu influencés par des taux inférieurs à 10%, et la différence de retrait devient plus marquante au-delà de 25 % et d'autant plus lorsque le béton est exposé à une dessiccation précoce [13].

Chindaprasirt et al [11] ont testé l'effet de la finesse des cendres volantes sur la déformation du retrait de dessiccation, les résultats confirment que toutes les pâtes aux cendres volantes présentent un retrait moins important quel que soit la finesse et ceci à cause du besoin en eau qui se voit être diminué avec la présence de ces cendres.

I.8 CONCLUSION

Bref, notre étude met en évidence les défis environnementaux posés par l'industrie cimentière, principalement en raison de la consommation élevée d'énergie et des émissions de CO₂ associées à la fabrication du ciment Portland. Face à ces défis, l'incorporation d'ajouts minéraux actifs et inertes dans les bétons et les pâtes se révèle être une stratégie prometteuse

Chapitre I : Synthèse bibliographique

pour améliorer les performances des matériaux de construction tout en réduisant leur empreinte environnementale.

Dans cette optique, l'étude de l'incorporation de la bentonite comme substitut partiel du ciment dans les pâtes ordinaires revêt une importance particulière. La bentonite, en tant que matériau argileux naturel, offre des propriétés pouzzolaniques potentielles qui peuvent améliorer la résistance, la durabilité et d'autres caractéristiques des pâtes. En évaluant les effets de la bentonite sur ces matériaux, nous avons l'opportunité de favoriser le développement de pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement et plus durables.

En fin de compte, notre étude souligne l'importance de la recherche continue dans le domaine des matériaux de construction alternatifs et de leurs impacts sur l'environnement. En explorant de nouvelles approches et en adoptant des solutions innovantes, nous pouvons contribuer à promouvoir la durabilité dans l'industrie de la construction tout en répondant aux besoins croissants en infrastructure et en habitat à l'échelle mondiale.

Chapitre II. Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

II.1 INTRODUCTION

Le travail de recherche présenté dans ce document vise à évaluer les possibilités de substitution partielle du ciment par la Bentonite, une roche argileuse naturelle. L'objectif est de caractériser les performances physiques et mécaniques de ce nouveau mélange cimentaire. Dans cette perspective, nous mettons en lumière l'utilisation spécifique de la Bentonite provenant de Hammam Boughrara, situé à Maghnia. Cette démarche s'inscrit dans une recherche visant à optimiser les matériaux de construction en explorant des alternatives durables et efficaces.

L'étude des pâtes cimentaires testées, tant à l'état frais qu'à l'état durci, requiert une compréhension approfondie sur l'influence de différents dosages de l'argile Bentonite sur plusieurs caractéristiques physiques et mécaniques et l'interaction entre plusieurs constituants des pâtes étudiées. Pour cette raison, ce chapitre se concentre sur les essais de caractérisation et d'identification des matériaux constituant les pâtes cimentaires étudiés. Les essais expérimentaux menés au cours de notre recherche sont présentés dans un organigramme et portent sur l'analyse des propriétés physiques des pâtes à l'état frais, et des propriétés mécaniques à l'état durci, avec des détails spécifiques sur certains procédés opérationnels.

Après toute une campagne de caractérisation des matériaux utilisés et notamment la Bentonite qui a été broyée, tamisée et calcinée (traitée thermiquement), le début de nos investigations s'est concentré sur l'évaluation des temps de prise des pâtes cimentaires testées à l'état frais (pâte témoin et celles à base de la Bentonite calcinée), ainsi que sur l'évaluation de la maniabilité et de l'air occlus piégé dans ces différentes pâtes. À l'état durci, différentes propriétés mécaniques et de durabilité ont été mesurées, principalement la résistance à la traction par flexion et la résistance à la compression ainsi que le retrait total (endogène + exogène) et la sorptivité capillaire du matériau. Ces propriétés ont été déterminées à différents stades de durcissement du matériau. Les protocoles d'essai présentés dans ce chapitre sont conformes aux normes en vigueur.

II.2 IDENTIFICATION DES MATERIAUX UTILISÉS

La caractérisation des matériaux de construction est une étape cruciale qui requiert une compréhension approfondie de la nature de ses composants. En effet, pour déterminer les dosages optimaux et interpréter correctement les résultats, il est indispensable que chaque constituant soit minutieusement caractérisé. Cette connaissance préalable permet de mieux appréhender les interactions entre les différents éléments du matériau, et ainsi d'optimiser sa composition et ses performances.

II.2.1 Le ciment

Un type unique de ciment a été utilisé pour les différentes compositions étudiées : le ciment **CEM I 42,5 N SR 3** fabriqué selon la **norme NA 442-**, provenant de la cimenterie Lafarge de la Wilaya de M'SILA. L'utilisation de ce ciment Portland résistant aux sulfates, est largement préférée dans le domaine de la construction dans plusieurs régions de l'Algérie, notamment dans des sites maritimes, en contact de l'eau, dans des ponts et surtout dans des fondations, ou généralement dans des zones où l'exposition aux chlorures est élevée comme des sites sur le littoral.

II.2.1.1 Caractéristiques chimiques du ciment utilisé

Les compositions chimiques et minéralogiques de ce ciment sont présentées dans le **Tab. II-1**, tandis que ses caractéristiques physiques sont consignées dans le **Tab. II-2**. Les analyses chimiques et les compositions minéralogiques ont été réalisées par la société des ciments de l'usine de M'Sila, tandis que l'étude des caractéristiques physico-mécaniques a été menée au laboratoire de génie civil à l'Université d'Ain-Temouchent.

Tab. II-1. *Composition chimique du ciment Portland CEM I 42,5 N SR 3.*

Composant	Quantité (%)
SiO ₂ (Silice)	20.6
Al ₂ O ₃ (Alumine)	7
Fe ₂ O ₃ (Oxyde de fer)	3.1
CaO (Chaux)	63.2
MgO (Magnésie)	2.6
SO ₃ (Anhydride sulfurique)	2.2
Na ₂ O (Oxyde de sodium)	0.2
K ₂ O (Oxyde de potassium)	0.6
Perte au feu	1.4

À partir des formules de Bogüe, la composition minéralogique a été calculée et les valeurs obtenues sont indiquées dans le **Tab. II-2** ci-dessous.

Tab. II-2. *Composition minéralogique du ciment Portland utilisé (CEM I 42,5 N SR 3).*

Minéral	C ₃ S (Alite)	C ₂ S (Bélite)	C ₃ A (Aluminates tricalciques)	C ₄ AF (Ferrite tétracalcique)	Gypse
Quantité (%)	57	25	3	10	5

Les résultats de l'analyse minéralogique obtenue montrent que ce type de ciment est avec un faible taux des aluminates tricalciques, ce qui peut clairement retarder le temps de prise. Sans oublier que le taux de C₃S qui est relativement faible influe (réduit) d'une façon significative sur la chaleur d'hydratation qui peut être dégagée une fois ce ciment est malaxé à l'aide de

l'eau. Ceci conduit certainement à des valeurs relativement réduites en retrait. Car, plus la chaleur d'hydratation est importante, plus le retrait de la pâte cimentaire est élevé.

II.2.1.2 Caractéristiques physiques du ciment utilisé

- Essai de consistance selon la Norme NF EN 196-3

La consistance de la pâte du ciment caractérise sa plus ou moins grande fluidité. L'objectif a pour définir une telle consistance dite « consistance normalisée à l'aide de l'appareil de VICAT » muni d'une sonde (**Fig. II-1**).



Fig. II-1. Appareil de VICAT avec la sonde pour la mesure de la consistance du ciment

Selon la norme **NF EN 196-3**, le malaxage de la pâte du ciment est effectué tel qu'il est indiqué sur le tableau ci-dessous (**Tab. II-3**).

Tab. II-3. Procédure du malaxage de la pâte du ciment selon la norme **NF EN 196-3**

Opération	Introduction de l'eau	Introduction du ciment	Malaxage	Raclage de la cuve	Malaxage
Durée	5 < t < 10 sec		90 sec	15 sec	90 sec
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente	Arrêt	Vitesse Rapide

Dans le but de déterminer la bonne consistance de la pâte du ciment CEM I utilisé, nous avons testé plusieurs rapports E/C jusqu'à obtention d'une pâte ayant une consistance de 27%

(correspondant à une profondeur de la sonde de (6 ± 1) mm par rapport au fond de la cuve tronconique de l'appareil du Vicat).

La figure **Fig. II-2** montre la variation de la consistance en fonction du rapport E/C pour la pâte témoin (sans la Bentonite).

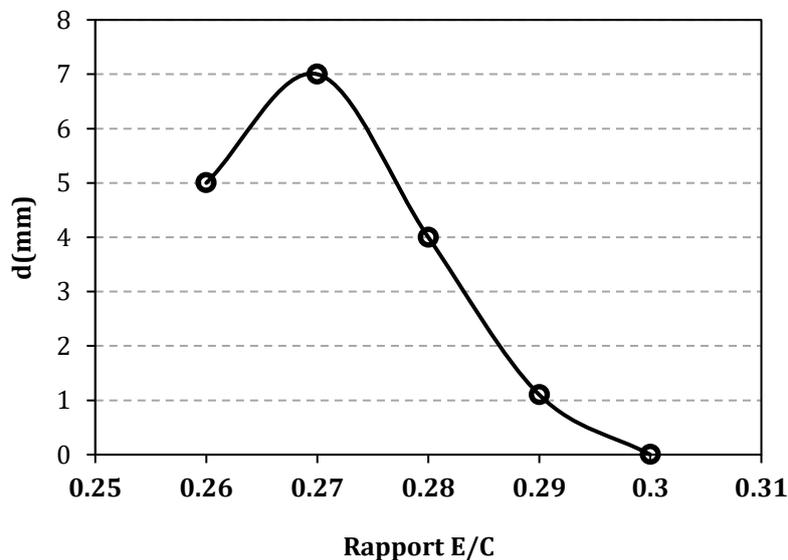


Fig. II-2. Évolution de la consistance du ciment CEM I en fonction du rapport E/C

D'après les résultats indiqués dans la **Fig. II-2**, la pâte témoin est avec une bonne consistance quand le rapport E/C est égal à 0,27. Par contre des testes préliminaires à l'aide de l'appareil Vicat a montré qu'il est impossible d'obtenir une pâte de bonne consistance lorsque 20 % du ciment est remplacé par de la Bentonite calcinée avec une calibre maximale des particules de 80 microns (une pâte ferme), car la Bentonite est très absorbante de l'eau utilisée pour le malaxage de la pâte. Il était donc très nécessaire, dès le début de cette étude, d'utiliser un adjuvant superplastifiant afin d'assurer la bonne consistance de la pâte à base de l'argile Bentonite, et par conséquent, de rester dans la même classe de fluidité (de maniabilité) pour toutes les formulations que nous envisageons tester.

Nous avons donc choisi un rapport E/L relativement supérieur (égal à 0,28) pour toutes les pâtes (témoin et celles contenant de la Bentonite), ainsi que de rajouter des dosages variables en superplastifiant haut réducteur d'eau pour les pâtes à base de la Bentonite calcinée. Ceci à permet de rester dans la même classe de Maniabilité (très plastique) pour toutes les pâtes testées dans cette étude (voir la classe de maniabilité dans le **Tab. II-2** ainsi que les résultats de consistance des différentes pâtes étudiées sur la **Fig. II-3**). Ci-dessous, la **Fig. II-3** montre les résultats de la consistance des différentes pâtes de Bentonite calcinée afin de pouvoir les comparer.

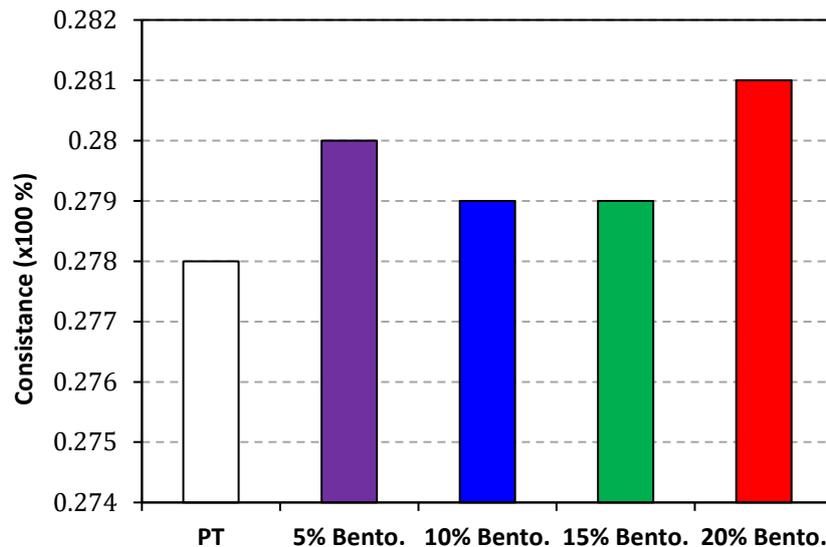


Fig.II-3. Evolution de la consistance des différentes pâtes modifiées par un superplastifiant en fonction de la teneur en Bentonite calcinée.

Les résultats illustrés dans la **Fig. II-3** montrent que la variation entre les valeurs de consistance des différentes pâtes est relativement faible (allant de 27,8 % pour la pâte de référence jusqu'à 28,1 % pour la pâte avec une teneur de 20 % de la Bentonite calcinée). Cela est dû par l'effet de l'adjuvant superplastifiant, ajouté par des quantités variables aux différentes pâtes testées dépendant des dosages en Bentonite utilisés. Ces consistances obtenues ont donc conduit à une même classification en fluidité (maniabilité) du matériau. Ce qui nous allons exposer plus bas dans la **Fig. II-9**

- Mesure de la masse volumique apparente du ciment (NF P 18-558)

L'essai consiste à peser un récipient vide d'un volume (V), puis le remplir sans tassement d'un matériau sec (ciment) et le peser ensuite (M).

La masse volumique apparente, selon la norme **NF P 18-558**, sera déduite de la formule suivante :

$$\rho_{app} = \frac{M}{V} \times 1000 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$$

- La masse volumique apparente compacte est déterminée par la pesée d'un récipient d'un litre, rempli de ciment avec un tassement de 25 coups par 3 couches.
- Mesure de la masse volumique absolue du ciment (NF P 18-558)

La masse volumique absolue est déterminée en utilisant le dispositif Le Chatelier représenté sur la figure ci-dessous (**Fig. II-4**)

La masse volumique absolue est déduite, selon la norme NF P 18-558, de la formule ci-dessous :

$$\rho_{abs} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} (Kg/m^3)$$

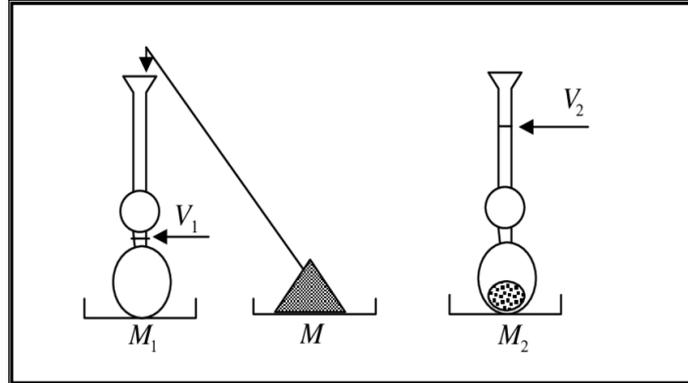


Fig. II-4. Dispositif expérimental de l'appareil Le Chatelier

➤ Mesure de la surface spécifique Blaine

La finesse indiquée par la surface spécifique ou la surface totale développée par tous les grains contenus dans un gramme de ciment. Cette mesure, exprimée en cm^2/g ,

Les ciments se présentent sous forme de poudre finement divisée. Cette finesse Blaine est une méthode utilisée pour mesurer la finesse de mouture du ciment : lors du gâchage, plus la surface de ciment en contact avec l'eau est grande et plus l'hydratation est rapide et complète. La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique : c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de la surface des grains du ciment par gramme de poudre. Elle varie généralement entre 3200 et 3800 cm^2/g selon le type de ciment. L'objectif de l'essai est d'apprécier cette surface des particules du ciment.

Le test de finesse Blaine vise à déterminer le débit d'air capable de traverser une poudre de ciment. Pour cela, on fait passer un volume d'air déterminé à travers la poudre de ciment. À conditions égales, plus la surface spécifique de la poudre est grande, plus le temps nécessaire à l'air pour traverser la poudre sera long. Autrement dit, une poudre de ciment avec des grains plus fins (donc une surface spécifique plus grande) ralentit davantage le passage de l'air.



Fig. II-5. *Perméabilimètre Blaine (Labo. de G. Civil - Univ. d'Ain Témouchent)*

Pour tester la perméabilité du ciment utilisé, nous commençons par placer une grille au fond de la cellule, puis ajoutons un papier filtre avant de verser le ciment et de le recouvrir d'un autre papier filtre (voir la **Fig. II-5**). Nous tassons le ciment avec un piston, retirons-le, et vérifions que le niveau du liquide dans la cellule atteint le trait inférieur, en ajustant si nécessaire. Ensuite, nous plaçons la cellule sur l'ajutage en assurant l'étanchéité avec une fine couche de vaseline autour de la jonction. Nous bouchons la cellule avec le pouce, aspirons le liquide avec une poire jusqu'au trait supérieur, puis fermons le robinet. Nous vérifions que le niveau reste constant pour confirmer l'étanchéité. Une fois l'étanchéité vérifiée, nous aspirons le liquide jusqu'au trait supérieur, fermons le robinet, et chronométrons le temps nécessaire pour que le niveau du liquide descende du 2^e trait au 3^e trait, soit t (en secondes). Nous évaluons la perméabilité en faisant la moyenne des temps obtenus à partir de trois mesures consécutives et notons également la température au moment du test.

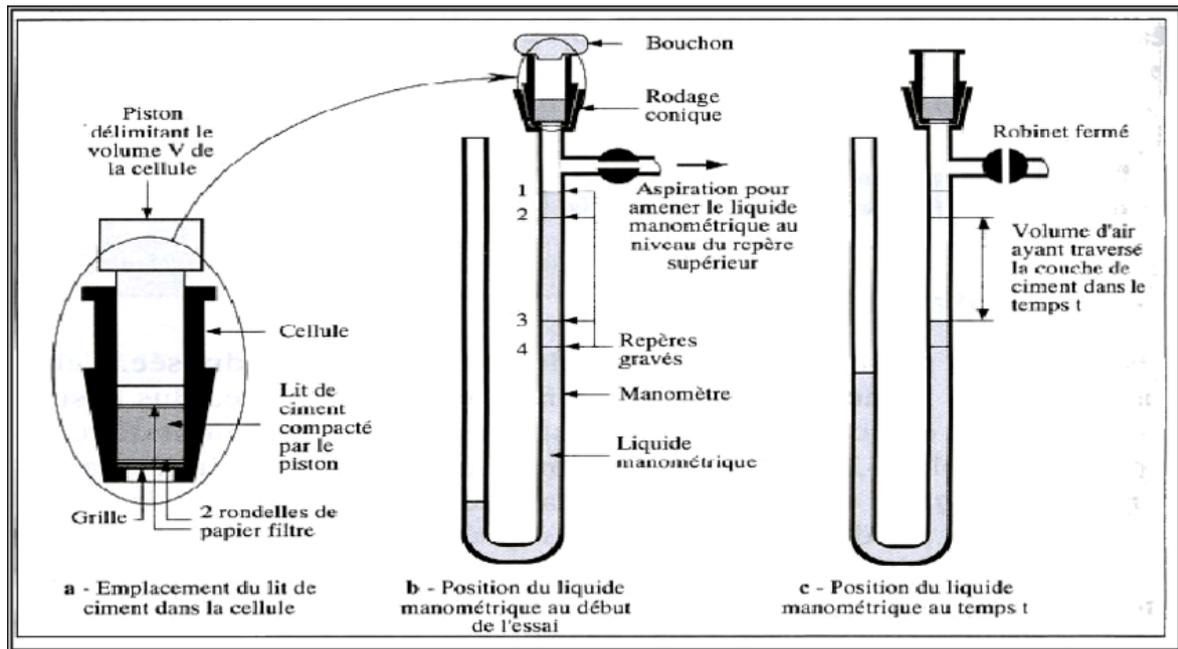


Fig. II-6. Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine

La surface spécifique Blaine est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$S_{sp} = \frac{K\sqrt{n^3}\sqrt{t_0}}{\rho_{abs}(1-n)\sqrt{0,1\eta}} (g/cm^2)$$

Interprétation des termes :

S_{sp} : Surface spécifique (g/cm^2)

K : Constante de proportionnalité (dépendant du matériau ou des conditions expérimentales)

n : Porosité ou fraction volumique de pores

t_0 : Paramètre de temps ou une autre constante liée à l'échantillon

ρ_{abs} : Densité absolue du matériau (g/cm^3)

η : Viscosité dynamique ou un autre paramètre lié aux propriétés du matériau (Pas ou autres unités de viscosité)

Tab. II-1. Caractéristiques physiques du ciment CEM I 42.5 N SR 3

Masse volumique apparente (Kg/m^3)	Lâche	1100
	Compacte	1352
Masse volumique absolue (Kg/m^3)		3100
Surface spécifique Blaine (g/cm^2)		3250

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Selon les résultats obtenus, les masses volumiques apparente et absolue du ciment utilisé, sont incluses dans l'intervalle imposé par la norme **NA 231** (Norme Algérienne, 1992), compris entre 0.900 – 1.100 g/cm³ pour la masse volumique apparente et 2.900 – 3.150 g/cm³ pour la masse volumique absolue.

Notons aussi que la surface spécifique Blaine des différentes poudres (ciment + Bentonite) a été aussi testées. Le Tableau ci-dessous (**Tab. II-5**) récapitule l'ensemble des résultats obtenus de la SSB.

Mélange en poudre (Ciment + Bentonite)	Surface Spécifique Blaine (SSB) cm²/g
Ciment seul (0% Bento.)	3250
95% C + 5% Bento.	3260
90% C + 10% Bento.	3410
85% C + 15% Bento.	3440
80% C + 20% Bento.	3510

Tab. II-5. La surface spécifique Blaine des différentes poudres (ciment + Bentonite)

II.2.2 La Bentonite (la Maghnite)

Un type unique de l'argile Bentonite de Maghnia a été utilisé pour les différentes compositions étudiées. Les gisements de la Bentonite du district de Hammam Boughrara dans la région de Maghnia ont été exploités en carrières, dont les plus importantes sont celles de Roussel 1, Roussel 2 et Dar Mbarak. Actuellement, la carrière de Dar Mbarak est en exploitation pour la production de Bentonite utilisée dans divers secteurs : comme additif viscosifiant pour les boues de forage pétrolier, comme liant pour le sable de moulage dans la fonderie, et comme charge industrielle pour diverses applications. L'argile Bentonite de cette région est très tendre, de couleur blanchâtre à verdâtre et onctueuse au toucher. Son extraction se fait sans recours à des explosifs, uniquement par décapage au bulldozer. Le tout-venant est transporté par camions de 15 tonnes vers l'usine située à 15 km de distance. L'exploitation actuelle porte sur l'extraction d'argiles brutes qui, après traitement, fournissent les différents types de Bentonite.

II.2.2.1 Préparation de la Bentonite

La bentonite est une argile naturelle largement utilisée dans diverses industries pour ses propriétés absorbantes et adsorbants. Dans notre travail expérimental de recherche, notre objectif est de pouvoir réduire au maximum sa capacité expansive (de gonflement), tout en gardant une bonne résistance mécanique du matériau cimentaire durci à base de la Bentonite. Notre idée est donc de traiter thermiquement cette argile expansive (de la famille des

Smectites), alors nous avons procédé une calcination, mais bien limitée afin de ne pas détruire la structure en feuillets des Montmorillonites dans la Bentonite testée. Les différentes étapes procédées dans ce travail pour la préparation de la Bentonite sont donc comme suit :

1. Broyage de la Bentonite brute

La première étape consiste à broyer la bentonite brute. Cela signifie que la matière première est réduite en petites particules. Le broyage est essentiel car il facilite le traitement ultérieur en augmentant la surface de contact des particules (la surface spécifique Blaine).

2. Tamisage pour uniformité :

Une fois la Bentonite est broyée, nous l'avons tamisé à l'aide d'un tamis de 80 μm . Cette opération permet d'augmenter la finesse des particules et d'obtenir une granulométrie uniforme de la Bentonite testée. En d'autres termes, seules les particules ayant une taille inférieure à 80 μm sont retenues, ce qui peut garantir une activité pouzzolanique probable dans le matériau cimentaire à long terme conduisant ainsi à une compacité élevée et donc à une porosité plus faible dans le matériau final à cause de la grande finesse de La Bentonite obtenue après broyage et le tamisage.

3. Calcination à haute température :

La Bentonite tamisée (la poudre obtenue) est ensuite chauffée dans un four à une température de 750°C pendant 3 heures. Cette étape, appelée calcination, est cruciale pour l'assurer la réactivité pouzzolanique recherchée pour la substitution envisagée. La chaleur intense élimine l'humidité et modifie la structure chimique de l'argile. En particulier, elle augmente la capacité de la Bentonite à absorber et retenir d'autres substances, ce qui est recherché dans de nombreuses applications industrielles.

II.2.2.2 Caractéristiques chimiques de la Bentonite utilisée

Les résultats de l'analyse chimique de l'argile Bentonite de Maghnia, utilisée dans ce travail de recherche sont indiqués ci-dessous dans le **Tab. II-6**.

Tab. II-6. *Composition chimique de la Bentonite (la Maghnite) utilisée.*

Composant	Quantités (%)
SiO₂ (Silice)	60
Al₂O₃ (Alumine)	22
Fe₂O₃ (Oxyde de fer)	5
MgO (Magnésie)	4
CaO (Chaux)	3
Na₂O (Oxyde de sodium)	4
K₂O (Oxyde de potassium)	1.5
TiO₂ (Oxyde de titane)	0.5
MnO (Oxyde de manganèse)	0.2
P₂O₅ (Anhydride phosphorique)	0.2
Perte au feu	12

Ces pourcentages peuvent légèrement varier en fonction des spécificités des gisements et des méthodes d'extraction et de traitement. Les argiles Bentonitiques de Maghnia sont principalement composées de silice et d'alumine, avec des quantités significatives d'oxydes de fer, de magnésie, de chaux et de sodium, ce qui leur confère des propriétés spécifiques adaptées à diverses utilisations industrielles telles que la viscosification des boues de forage, le liant dans le moulage de sable en fonderie, et comme charge industrielle.

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

Les résultats de la composition minéralogiques sont donnés dans le tableau ci-dessous (**Tab. II-7**)

Tab. II-7. *Composition minéralogique de la Bentonite de Maghnia.*

Minéraux	Quantités (%)
Montmorillonite	76
Quartz	9
Feldspaths	4
Calcite	4
Illite	3
Kaolinite	2
Autres minéraux (traces)	2

La bentonite de Maghnia est principalement composée de montmorillonite, ce qui lui confère ses propriétés d'absorption et de gonflement. La présence de quartz, de feldspaths, de calcite, d'illite et de kaolinite influent également ses caractéristiques et ses performances dans différentes applications industrielles. Les autres minéraux présents en traces peuvent varier en fonction des conditions géologiques spécifiques des gisements.

Il est important de noter aussi qu'un matériau est considéré à caractère pouzzolanique si sa composition chimique vérifiée : $Al_2O_3 + SiO_2 + Fe_2O_3 > 70 \%$. Alors, compte tenu des résultats du **Tab. II-5** et d'après les précisions du LTPO que l'argile Bentonite calcinée étudiée contient un pourcentage en chaux libre CaO négligeable, on peut attribuer à la Bentonite de Maghnia (une fois calcinée) le caractère d'une pouzzolane artificielle.

II.2.2.3 Caractéristiques physiques de la Bentonite utilisée

Le tableau ci-dessous (**Tab. II-8**) récapitule les différents résultats de la caractérisation physique de la vase calcinée.

Tab. II-8. *Caractéristiques physiques de la bentonite calcinée*

Caractéristiques de l'argile bentonite	Quantités
Masse volumique apparente lâche (g /cm ³)	0,8
Masse volumique absolue (g /cm ³)	2,7
Surface spécifique Blaine (cm ² /g)	4980

Il est important de noter ici que le broyage effectué pendant 3 heures à l'aide d'un broyeur à boulet dans le laboratoire, ainsi que le tamisage à 80 µm, ont conduit à l'obtention d'une poudre Bentonitique plus fine (avec une finesse de 4980 cm²/g) par rapport à celle du ciment qui est de 3250 cm²/g

II.3 PREPARATION DES EPROUVETTES

Les différentes pâtes à tester dans ce travail de recherche sont élaborées conformément aux compositions données dans le tableau ci-dessous (**Tab. II-9**). Nous rappelons que le rapport E/L était constant dans toutes les formulations étudiées afin de pouvoir distinguer clairement l'influence des différents dosages de la poudre Bentonitique calcinée.

Tab. II-9. *Les différentes compositions des pate étudiées*

Formulation (%)	Ciment (g)	Bentonite (g)	Eau (L)	Adjuvants (%)
MT	1400	0	390	0,06
5% Bentonite	1330	70	390	0,12
10% Bentonite	1260	140	390	0,14
15% Bentonite	1190	210	390	0,16
20% Bentonite	1120	280	390	0,18

La confection de toutes les éprouvettes a été effectuée dans une température ambiante dans le laboratoire (T = 20 ± 2° C).

Le mode de préparation des gâchées a été effectué selon la norme **NF EN 196-3** et a été uniformisé dans ce travail de recherche pour la confection de toutes les séries d'éprouvettes des pâtes étudiées. En effet, après avoir pesé les quantités du ciment et de la Bentonite, les composants sont introduits dans le malaxeur et l'opération de malaxage est procédée selon la norme **NF EN 196-3** comme elle est indiquée dans le **Tab. II-3**. Il est important de noter ici

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

que dans le cas de la préparation d'une gâchée avec de la Bentonite, cette dernière est mélangée à sec avec la quantité du ciment et donc introduite en même temps dans la cuve de malaxeur avec le ciment.

- Pour la confection de nos éprouvettes, nous avons utilisé des moules métalliques normalisés permettant de réaliser 3 éprouvettes prismatiques de section carrée (4×4) cm^2 et d'une longueur de 16 cm,
- Pour le remplissage de moule (en trois couches), ce moule métallique doit être fixé à la table à choc permettant d'appliquer 60 chocs au moule, en le faisant chuter d'une hauteur constante à chaque fois pendant 60 secondes,
- Une fois les moules sont bien remplis à l'aide de la table à choc et la pâte est bien arasée, nous les avons recouverts avec de papier filme,
- La conservation de ces moules a été effectuée à une température d'environ 20°C et le démoulage a été effectué après 24 h de conservation (**Fig. II-7**). Une fois les éprouvettes de pate cimentaire sont démoulées, nous les avons conservés dans de l'eau à une température de $20 \pm 2^\circ \text{C}$ (**Fig. II-8**) conformément à la norme **NF P 15-402**.



Fig. II-7. Moules d'éprouvettes prismatiques ($4 \times 4 \times 16$) cm^3



Fig. II-8. Conservation des éprouvettes dans l'eau à 20 ± 2 °C selon la norme NF P 15-402

II.4 MESURES EXPERIMENTALES

II.4.1 Essai sur pâte à l'état frais

- **Mesure de la maniabilité selon les normes NF P18-452**

Il s'agit à partir de cet essai d'une méthode de mesure qui permet d'évaluer la fluidité (l'écoulement) de la pâte cimentaire, La maniabilité des pâtes est mesurée au maniabilimètre LCL à pâte, conformément à la norme NF P 18-452. Cette grandeur est caractérisée par la mesure d'écoulement qui est autant plus grand que la consistance de la pâte est épaisse. Elle est caractérisée par le temps nécessaire pour l'écoulement du mortier sous vibration

Comme l'attestent les résultats de maniabilité illustrés ci-dessous dans la **Fig. II-9** aucune pâte n'a posé de difficulté de mise en place lors de la confection. Nous pensons que c'est principalement grâce à l'utilisation d'un adjuvant superplastifiant qui a facilité la mise en œuvre du matériau. La maniabilité est, dans ce cas, une mesure très utile pour apprécier l'influence de la bentonite sur la fluidité d'une pâte. Le schéma ci-dessous présente le principe de l'essai de maniabilité de la pâte à l'aide de perméabilimètre LCL.

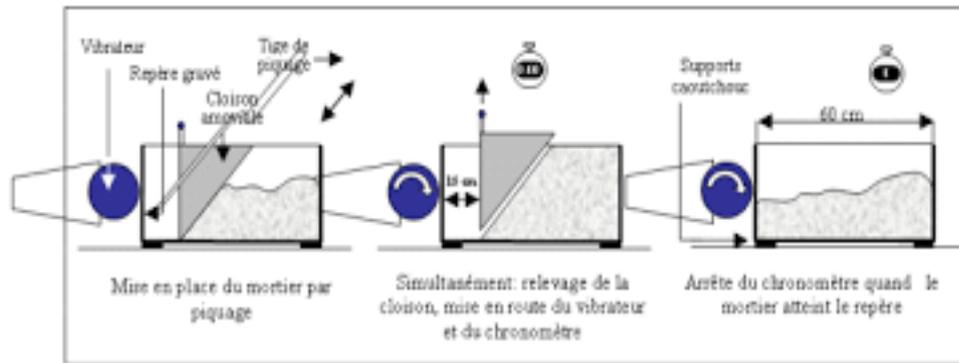


Fig. II-9. Principe de fonctionnement du maniabilimètre

Le résultat de la mesure de maniabilité est le temps T mis par la pâte pour atteindre le trait repère du maniabilimètre. On en déduit la classe de consistance de la pâte comme suit (**Tab. II-9**) :

Tab. II-10. Type de pâte selon le temps de maniabilité

Classe de consistance	Durée en (s)
Ferme	$T \geq 40$
Plastique	$20 < T \leq 30$
Très plastique	$10 < T \leq 20$
Fluide	$T \leq 10$

Les résultats de maniabilité obtenus pour toutes les pâtes étudiées sont illustrés en histogrammes dans le chapitre 3 (**Fig. III-1**).

- **Mesure de l'air occlus selon la norme NF P18-353**

L'air occlus est dû au volume d'air entraîné au sein du matériau lors des opérations de malaxage et qui reste piégé dans la pâte après la mise en œuvre (remplissage des moules, vibration). Celui-ci dépend du mélange du liant : ciment, bentonite, adjuvant, de l'ouvrabilité de la pâte et enfin de l'énergie de serrage développée lors de la mise en œuvre (l'énergie de vibration). Pour cela un aéromètre est utilisé pour mesurer l'air dans le matériau cimentaire à l'état frais (pendant le processus de fabrication) (**Fig. II-10**). Le remplissage de l'aéromètre se fait en deux couches, chaque couche étant compactée par 10 coups de tige.



Fig. II-10. *Dispositif de mesure de la teneur en air occlus (aëromètre)
(Labo. de G. Civil - Univ. d'Ain Témouchent)*

La **Fig. II-11** présente l'évolution de l'air occlus dans les pâtes cimentaires, étudiés à l'état frais, en fonction de leurs teneurs en Bentonite calcinée. Nous rappelons que chaque résultat présenté dans la figure ci-dessous (**Fig. II-11**) correspond à la moyenne arithmétique de trois mesures obtenues par trois essais de l'air occlus effectués pour chaque formulation de pâte testée.

Pourtant que la variation des valeurs obtenues de l'air piégés dans les pâtes étudiées n'est pas très significative, mais il est quand même remarquable que la quantité de l'air occlus devienne plus faible quand la teneur de la pâte en Bentonite est plus importante. Cela peut être expliqué que peu d'air pourra être piégé dans le matériau quand la quantité de l'eau est plus absorbée par la Bentonite, connue par sa forte capacité absorbante à cause de sa forte teneur en Montmorillonite, ce qui pourra conduire à une hydratation incomplète des grains solides dans la pâte fraîche contenant un dosage élevé de Bentonite. Par ailleurs, à cause de la grande finesse de la Bentonite ajoutée (SSB élevée par rapport au ciment), les pores de tailles moyenne à petite deviennent moins nombreuses dans le squelette granulaire, ce qui empêche l'hydratation complète des différentes particules au sein du matériau et permet à l'échappement de l'air lors de gâchage de la pâte contenant la poudre Bentonitique.

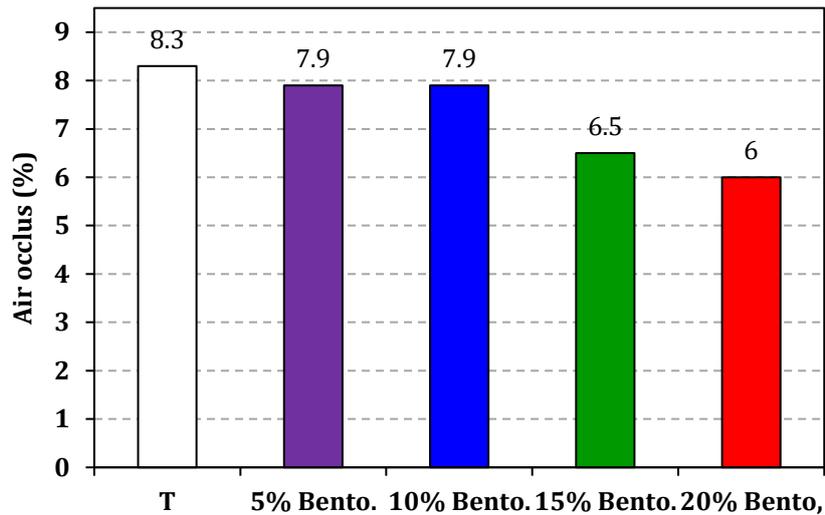


Fig. II-11. Influence de la teneur en Bentonite calcinée sur la quantité d'air occlus dans les pâtes étudiées.

- **Mesure de début et de la fin de prise**

Il est nécessaire de connaître le temps de début de prise des liants hydrauliques en vue de déterminer le temps disponible pour la mise en œuvre in situ des matériaux cimentaires, dont ils sont confectionnés. Les essais se font à l'aide de l'aiguille de Vicat (voir la **Fig. II-12**) qui donne deux repères pratiques : Le début et la fin de prise.



Fig. II-12. Appareil de VICAT muni d'une aiguille pour la mesure du temps de prise

Les résultats de l'essai de consistance et de prise sont illustrés dans la figure ci-dessous (**Fig. II-13**).

La figure ci-dessous (**Fig. II-13**) représente la variation du temps de prise des différentes pâtes de ciment testées. Alors, les résultats montrent que le temps de prise diminue avec l'augmentation de la quantité de la Bentonite calcinée ajoutée par substitution dans la pâte.

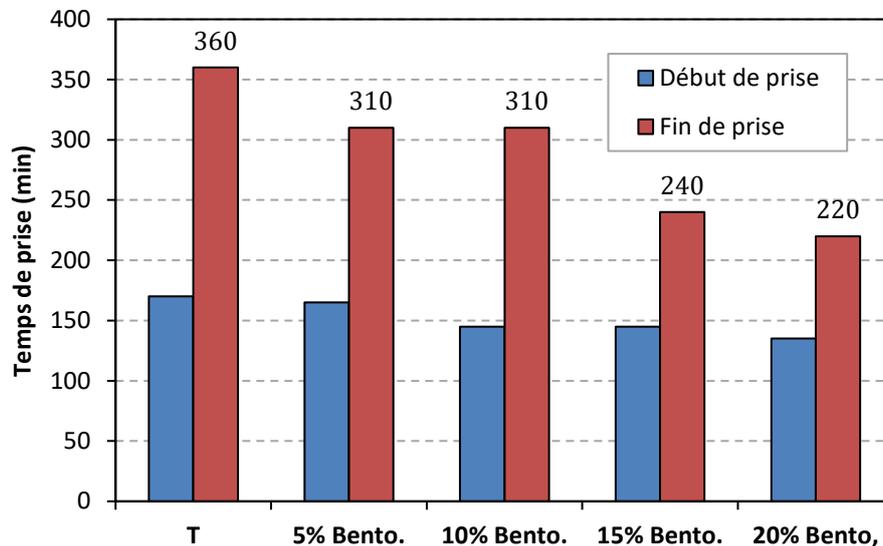


Fig. II-13. Variation du temps de prise des différentes pâtes des ciments étudiés

II.4.2 Les essais durcis

- **Essais de résistance mécanique**

Pour évaluer la résistance mécanique des pâtes étudiés, des essais destructifs ont été réalisés en flexion et en compression sur des éprouvettes de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$. Ces essais ont été effectués à différents intervalles, à savoir 7, 14,28 et 90 jours, permettant ainsi de suivre l'évolution progressive des performances.

Conformément à la norme EN 196-1, chaque éprouvette a été soumise à des essais en flexion et à deux essais en compression. Ainsi, chaque valeur de résistance à la compression est obtenue en moyennant six mesures, étant donné que les résultats à chaque intervalle sont la moyenne de trois échantillons.

- **Resistance à la traction par flexion**

Le test de résistance à la flexion est largement utilisé pour évaluer les propriétés mécaniques des pâtes. Il implique l'application de forces de tension opposées sur trois points d'une éprouvette de matériau, le long de son axe longitudinal. La Figure 14 présente de manière schématique le principe de cet essai à trois points sur une éprouvette de pâte.

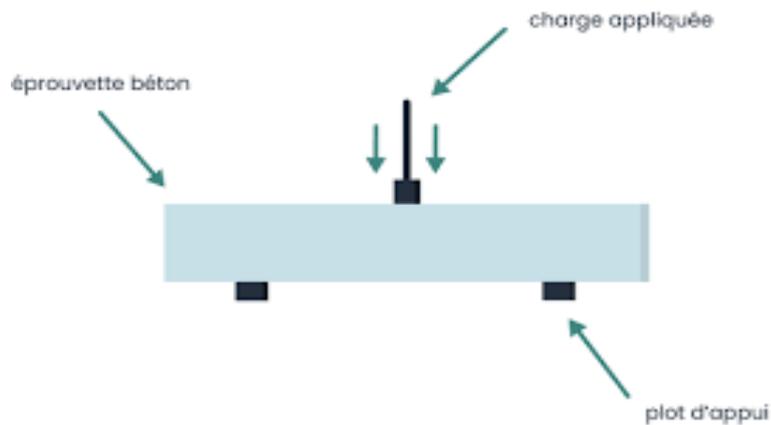


Fig. II-14. Dispositif pour l'essai de la résistance à la traction par flexion de la pâte

- **Résistance à la compression**

La résistance à la compression est une méthode permettant d'évaluer la capacité d'un matériau à supporter une charge d'écrasement. L'échantillon est soumis à une compression, et la force nécessaire pour le comprimer est mesurée. La Figure II-13 illustre de manière schématique le principe de l'essai d'écrasement sur un échantillon de pâte.

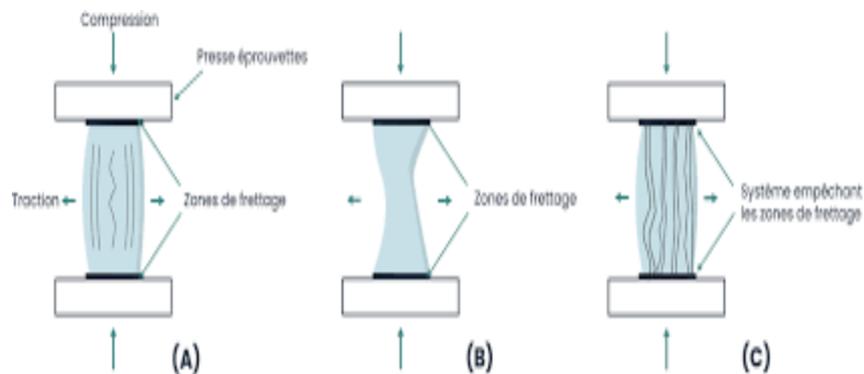


Fig. II-15. Dispositif pour l'essai de la résistance à la compression de la pâte

Dans le cadre de notre campagne expérimentale au laboratoire de génie civil du CUAT, nous avons utilisé une presse hydraulique pour mesurer les résistances mécaniques de nos pâtes étudiées. La Figure II-16 illustre cet équipement.



Fig. II-16. Ecrasement des éprouvettes (40x40x160) cm³ à l'aide d'une presse hydraulique de 250KN (Lab. de G. civil-UAT)

- **Essai de l'absorption capillaire**

L'absorption capillaire est un phénomène physique interne aux milieux poreux, résultant des forces de capillarité.

Ce test implique une mesure directe de l'ascension capillaire d'un liquide. Pour ce faire, on place la surface plane d'un échantillon légèrement immergé dans de l'eau. La hauteur de l'ascension est généralement proportionnelle à la racine carrée du temps.

Une caractéristique notable de cette méthode est son indépendance vis-à-vis de la composition granulométrique, notamment de la proportion entre granulats et pâte de ciment. De plus, elle offre la possibilité d'une différenciation locale quasi ponctuelle de la capillarité.

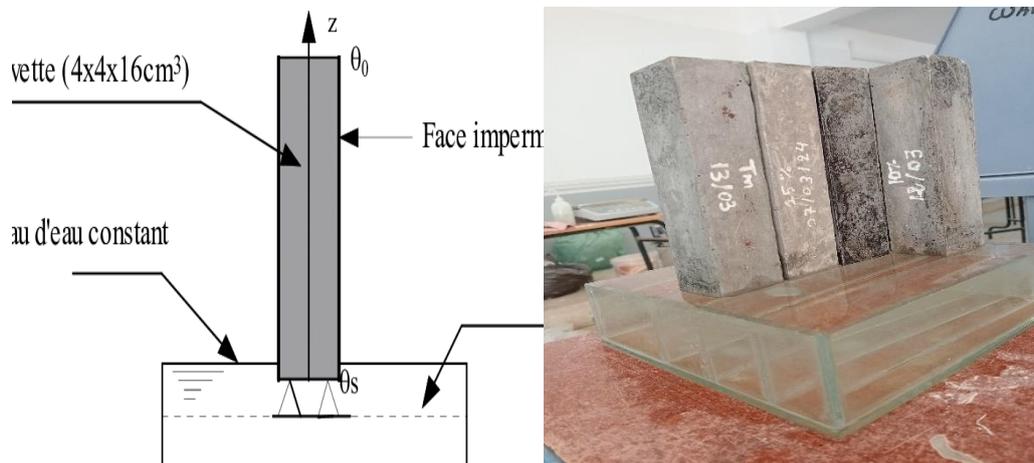


Fig. II-17. Schéma du principe de l'essai d'absorption

- **Retrait des éprouvettes avec différents pourcentages**
- **L'additif bentonite**

Les éprouvettes de dimensions (40 x 40 x 160) mm³ ont été préparées avec divers pourcentages de l'additif bentonite, à savoir 0%, 5%, 10%, 15%, et 20%. Les essais de retrait

ont été réalisés pour chaque série d'échantillons afin d'observer l'influence de la bentonite sur le comportement de retrait des pâtes.

1. **Éprouvettes sans bentonite (0%) :**

- Ces échantillons servent de référence pour comparer l'effet de la bentonite sur le retrait.

2. **Éprouvettes avec 5% de bentonite :**

- Un ajout de 5% de bentonite pour observer son influence initiale sur le retrait.

3. **Éprouvettes avec 10% de bentonite :**

- En augmentant la proportion à 10%, on évalue comment une quantité plus importante de bentonite affecte le retrait.

4. **Éprouvettes avec 15% de bentonite :**

- Une proportion de 15% permet d'analyser un impact encore plus significatif de la bentonite.

5. **Éprouvettes avec 20% de bentonite :**

- Enfin, l'ajout de 20% de bentonite vise à déterminer l'effet maximal testé sur le retrait.

II.5 ETUDE EXPERIMENTALE

Afin de bien valoriser l'argile Bentonite dans le but de l'utiliser comme ajout minéral dans des pâtes ordinaires pour la construction, nous avons procédé à la quantification de son effet sur la déformation due à la dessiccation, ou autrement dit sur le retrait exogène.

Les mesures de retrait de dessiccation concernent les éprouvettes de la pâte séchant à l'air libre du laboratoire à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Les pâtes destinées pour la mesure du retrait contiennent 5, 10, 15 et 20 % de la Bentonite ajoutée par substitution d'une quantité du ciment portland.

La composition et les caractéristiques des matériaux utilisés sont déjà regroupées, plus haut, dans le tableau 1. Les éprouvettes de la pâte sont confectionnées avec les proportions sable-liant-eau de 3 : 1 : 0.3. Nous rappelons qu'une quantité de 1, ?? % d'un superplastifiant (le nom de superplastifiant ??) a été ajoutée afin d'améliorer la maniabilité des pâtes testés. Les mélanges sont coulés dans des moules prismatiques (4 x 4 x 16) cm³ et recouverts d'un film plastique transparent afin d'empêcher toute évaporation d'eau au très jeune âge. Après 24 H de conservation, le démoulage des éprouvettes est procédé et la conservation est effectuée à

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

l'air libre de laboratoire à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Les mesures de retrait exogène ont été effectuées depuis l'âge de deux jours (48H) et jusqu'à l'âge de 90 jours pour les cinq différentes formulations du pâte testées.

Lors de la mesure du retrait, l'éprouvette est placée dans un bâti de mesure de déformations de retrait doté d'un comparateur ayant une précision de $1\mu\text{m}$. La figure 1 montre la position d'éprouvette de la pâte dans le dispositif de mesure.

II.5.1 Campagne des essais expérimentaux

Les différentes pâtes préparées pour cette étude ont été soumis à une série d'essais, incluant des tests destructifs et non destructifs. La réalisation de ces essais a suivi l'organigramme présenté dans la Figure II-18

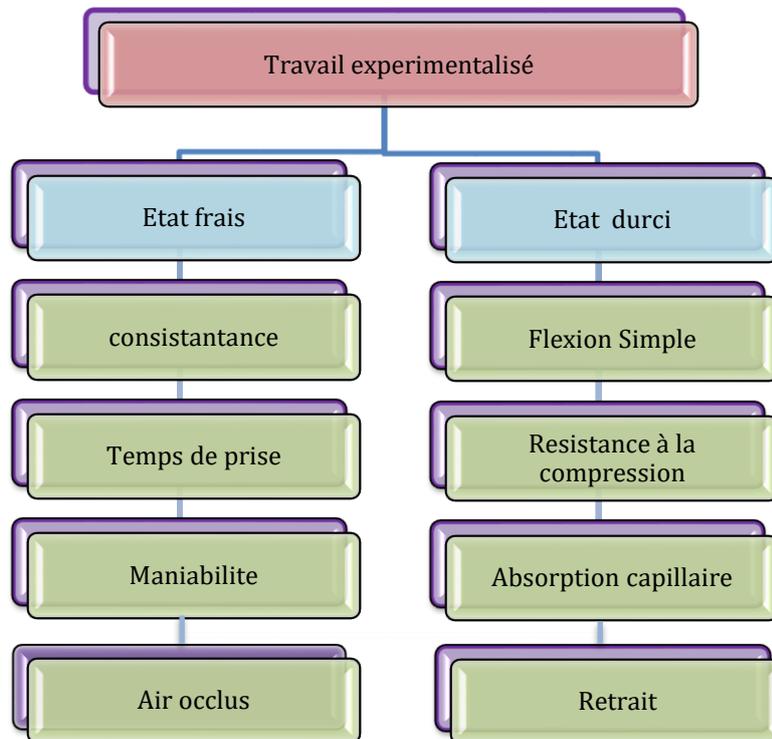


Fig. II-18. Organigramme représentatif des différents essais effectués

II.6 CONCLUSION

Ce chapitre a successivement abordé la présentation des programmes expérimentaux, la description des paramètres retenus pour les matériaux et le regroupement de l'ensemble des essais réalisés. Notre démarche a consisté dès le début à réaliser plusieurs expérimentations

Chapitre II : Matériaux utilisés et méthodes expérimentales

sur différents matériaux, en utilisant diverses méthodes d'essais physiques, d'analyses chimiques et d'analyses minéralogiques effectuées en laboratoire. Cela nous a permis d'obtenir une idée générale sur les caractéristiques principales des matériaux utilisés dans la formulation des pâtes étudiés dans ce travail de recherche, tant du point de vue physique que mécanique. Le présent travail examine l'influence de la bentonite de Maghnia, utilisée en substitution du ciment conforme à la norme - CEM I 42,5 N SR 3, sur les caractéristiques physico-mécaniques des pâtes. Cette étude se base sur des variations dans la teneur en bentonite. Les méthodes expérimentales choisies dans ce chapitre, qu'elles soient destructives ou non destructives, revêtent une grande importance et peuvent être considérées comme très fiables pour étudier l'influence de la bentonite sur le comportement physique et mécanique des pâtes. Par exemple, la méthode de propagation des ondes ultrasoniques est particulièrement utile pour cette analyse. Ainsi, nous avons pu obtenir une compréhension générale des caractéristiques principales des matériaux servant à la formulation des pâtes étudiés, ainsi que de l'influence de la bentonite de Maghnia sur les performances des pâtes du point de vue physique et mécanique.

Chapitre III : Analyse et discussions des résultats

III.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous exposons les différents résultats expérimentaux relatifs aux différents essais effectués sur les pâtes cimentaires étudiées à l'état frais et à l'état durci, conformément aux modes opératoires établis (notamment concernant la résistance mécanique, la sorptivité capillaire et le retrait total du matériau). Une analyse approfondie et à une discussion des résultats obtenus sont présentées dans ce troisième chapitre. Par ailleurs, des corrélations sont effectuées dans ce chapitre entre différentes propriétés physiques et mécaniques des pâtes étudiées, à l'état frais et durci, telles que la résistance à la compression et absorption capillaire et/ou la maniabilité. Par conséquent, des relations mathématiques sont élaborées dans ce chapitre, reliant les différents paramètres mesurés à l'état frais et durci, à différents âges du matériau. Cette approche nous permettra d'obtenir une compréhension plus complète des comportements des pâtes et des relations entre leurs propriétés à divers stades de maturation.

III.2 INFLUENCE DE LA BENTONITE CALCINÉE SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DE LA PÂTE CIMENTAIRE À L'ÉTAT FRAIS.

III.2.1 Résultats de la maniabilité

En se basant sur l'essai réalisé conformément à la norme **NF P18-452**, il est possible de déterminer la classe d'ouvrabilité des différentes pâtes (classement indiqué dans le **Tab. II-9**). Les résultats obtenus concernant la maniabilité des diverses formulations de pâtes étudiées sont présentés sous forme d'histogrammes dans ce chapitre. Ces graphiques permettent de visualiser et de comparer aisément les variations de maniabilité entre les différentes compositions de pâtes, fournissant ainsi une compréhension approfondie des performances des formulations analysées **Fig. III-1**.

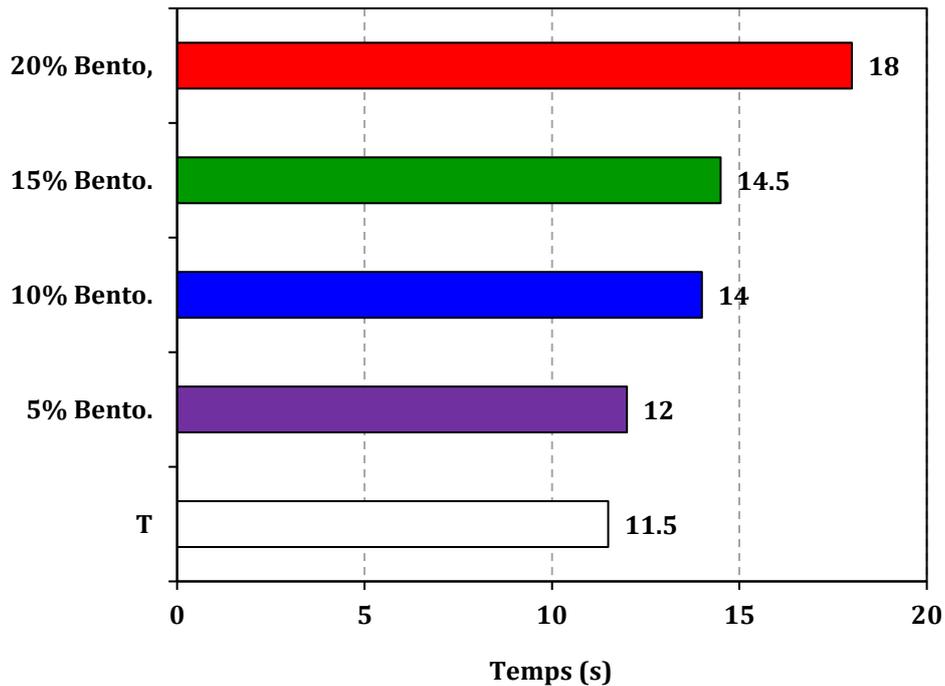


Fig. III-1. Variation de la maniabilité dans les pâtes à base de la Bentonite calcinée.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'ajout de la Bentonite, calcinée et finement broyée, influe clairement sur la maniabilité des pâtes à l'état frais. Lors de l'analyse des temps de maniabilité, la pâte témoin (sans Bentonite) s'est révélé très plastique, avec un temps de maniabilité qui égal à 11,5 secondes, pendant que l'incorporation de 20 % de la poudre Bentonite a entraîné un temps de maniabilité de 18 secondes. Alors, malgré que les pâtes testées soient modifiées avec un adjuvant superplastifiant, qui permet à un écoulement (une fluidité) plus facile et à une viscosité faible du matériau cimentaire, mais la poudre Bentonitique a significativement augmenté le temps de Maniabilité, pourtant que les dosages en Bentonite utilisés ne sont pas trop importants dans ce travail expérimental. Ceci est expliqué principalement par la capacité absorbante de la Bentonite par laquelle elle est très connue (à cause de sa grande teneur en Montmorillonite), mais également, la grande finesse de la poudre Bentonite utilisée ($SSB = 4980 \text{ cm}^2/\text{g}$) contribue aussi significativement à cette réduction en maniabilité. Nous pensons, qu'avec l'utilisation des dosages plus forts en Bentonite (30 ou 40 % par exemple) et avec moins d'adjuvant superplastifiant, cette influence de l'argile Bentonite sur la maniabilité de la pâte aurait pu être beaucoup plus remarquable (drastique).

Notons aussi que la Bentonite utilisée a été traité thermiquement (Bentonite calcinée à 750°C) avant de l'utiliser dans cette campagne expérimentale, ce qui a pu limiter (réduire) sa capacité absorbante d'eau. La chose qui nous laisse penser que ces résultats de maniabilité auraient

pu être supérieurs par rapport à ceux indiqués dans la **Fig. III-1**. Si la Bentonite a été utilisée brute (broyée mais non calcinée).

III.2.2 Résultats de l'air occlus

Dans cette étude, nous avons utilisé un aéromètre pour observer l'impact de différents dosages de la Bentonite étudiée sur la quantité d'air piégée dans les pâtes testées au cours de leur fabrication. La **Fig. III-2**. Présente l'évolution de l'air occlus de la pâte cimentaire en fonction de sa teneur en poudre Bentonitique (exprimée en pourcentage). Nous rappelons que les histogrammes présentés dans la **Fig. III-2**. Correspondent à la moyenne arithmétique de trois valeurs d'air occlus obtenues à partir de trois essais de mesure de l'air occlus répété pour chaque formulation de pâte étudiée. Cette répétabilité de mesures effectuée permet de donner une représentation plus fiable et précise de l'effet de la bentonite sur l'air occlus dans les pâtes à l'état frais.

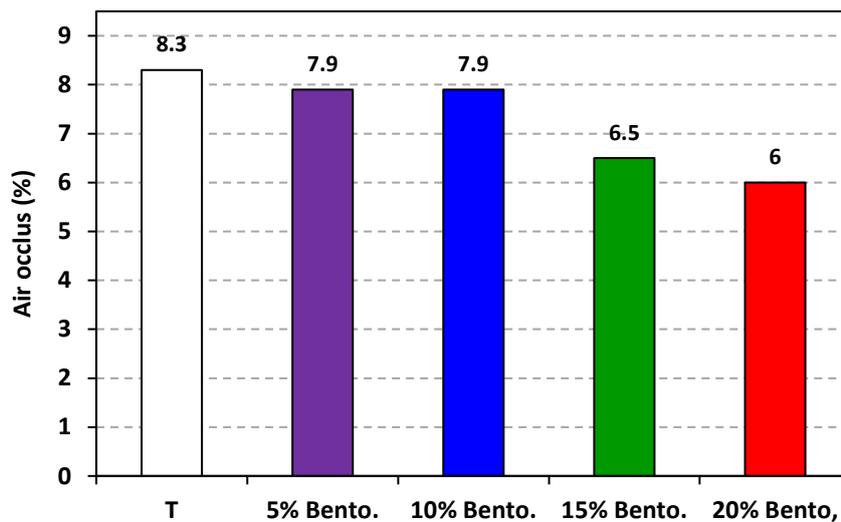


Fig. III-2. Variation des pourcentages d'air occlus dans les pâtes à base de la Bentonite calcinée.

La **Fig. III-2** montre clairement que l'ajout de l'argile Bentonite ajoutée entraîne une diminution de l'air occlus dans les échantillons des pâtes testés à l'état frais, dépendant des dosages en Bentonite utilisés. Les résultats obtenus indiquent une valeur de 8,3 % d'air occlus dans la pâte de référence (sans Bentonite), pendant que la valeur d'air piégée dans la pâte contenant 20% de Bentonite est égale à 6%. Cette diminution en air occlus est proportionnelle au dosage de la Bentonite (voir la **Fig. III-2**). Cette diminution en air occlus avec l'augmentation en dosage de Bentonite est expliquée par sa capacité absorbante très élevée

de l'eau de gâchage, car le matériau ici est toujours à l'état frais et dans la première phase de l'hydratation. Son absorption entre les feuillets de Montmorillonite (dans la structure du Matériau Bentonitique) conduit à un échappement de l'air entre les particules de la Bentonite finement broyée à l'origine. Ce n'est qu'à l'aide de l'adjuvant superplastifiant haut réducteur d'eau que l'opération de malaxage a été réalisée avec succès. Il est important de noter que l'adjuvant superplastifiant utilisé participe d'une façon très significative à l'échappement de l'eau de la pâte pendant les premières minutes de l'hydratation (pendant). Nous pensons ici que cette évolution de la quantité d'air piégée dans les différentes formulations testées est plus influencée par l'effet de l'adjuvant utilisé que par la Bentonite ajoutée. Il est donc même possible de croire que cette évolution (en diminution) selon le dosage en Bentonite, prend un sens inverse si l'adjuvant superplastifiant n'était pas présent dans les pâtes cimentaires testées, et que la quantité de l'air pourrait être plus élevée quand la pâte contient plus de Bentonite.

III.3 INFLUENCE DE LA BENTONITE CALCINÉE SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DE LA PÂTE CIMENTAIRE À L'ÉTAT DURCI

III.3.1 Résultats de la résistance à la traction par flexion

Dans cette étude, nous avons analysé la résistance à la traction par flexion (réalisée à trois points) des différentes éprouvettes de la pâte durcie dans le cas des différentes teneurs en Bentonite (0, 5, 10, 15 et 20%). Les résistances ultimes à la flexion ont été mesurées à plusieurs âges (à 7, 14, 28 et à 90 jours), et les résultats sont basés sur la moyenne de trois mesures pour chaque formulation de pâte.

Il est clairement remarquable à partir des résultats obtenus (**Fig. III-3.**) **que la résistance à la traction augmente avec l'âge du matériau.** Une évolution progressive d'endurcissement des différentes pâtes cimentaires (témoin et celles modifiées avec l'ajout de la Bentonite) est enregistrée.

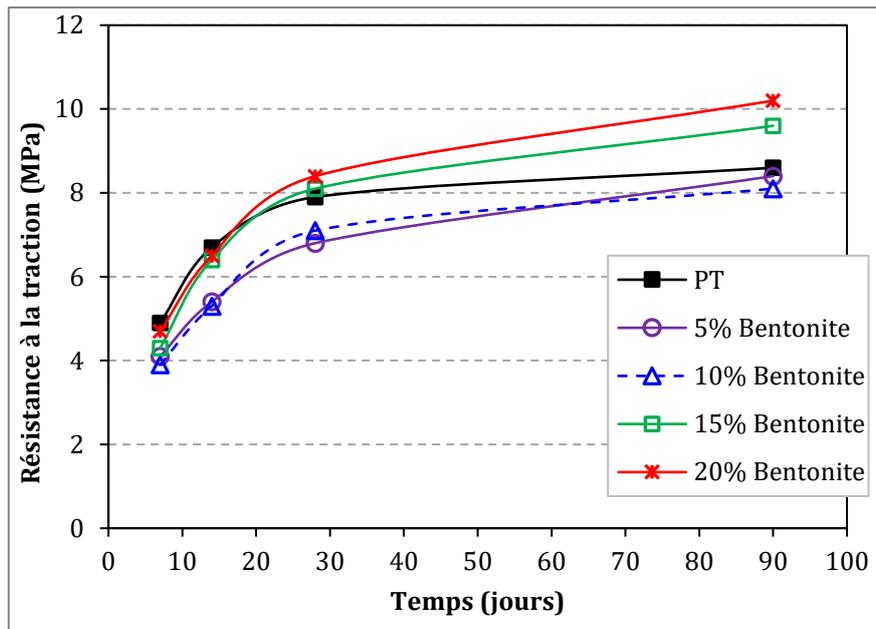


Fig. III-3. Influence de dosage en Bentonite sur l'évolution de la résistance à la traction en fonction de l'âge des pâtes testées.

Les résultats montrent que la résistance à la traction des pâtes s'améliore avec l'augmentation en pourcentage de la Bentonite utilisée, ainsi qu'avec l'âge du matériau (des éprouvettes testées). À l'âge de 7 jours, l'influence de la Bentonite calcinée ajoutée à la pâte ne peut être remarqué. Ce n'est qu'à long terme (au-delà de 28 jour et notamment à 90 jours) que la variation entre les valeurs de résistance est remarquable. Il est clairement observé, à partir des courbes obtenues, que la croissance de la résistance à la traction des pâtes durci contenant de la Bentonite calcinée est plus importante entre l'âge de 28 et 90 jours par rapport à celle (l'augmentation en résistance) enregistrée dans le cas de la pâte de référence (sans Bentonite) dans la même période (le même intervalle du temps). À 90 jours, la résistance à la traction atteint une valeur de 10,2 MPa dans le cas de la pâte avec 20 % de Bentonite pendant que la résistance à la traction des éprouvettes témoins donne une valeur moyenne 8,6 MPa. Cela est due principalement à la réactivité pouzzolanique qui peut être produite au sein du matériau à base de la Bentonite calcinée. Le traitement thermique (une cuisson pendant 3H à 750 °C) a permis donc de réactiver l'argile Bentonite et donc à conduit à une teneur plus importante en CSH. La formation supplémentaire de ce liaisons CSH conduit certainement à une croissance (une augmentation) en résistance à long terme (une fois ces liaisons sont de plus en plus créées).

(Figure III-4.) présentée ci-dessous illustre la variation de la résistance mécanique à la compression des pâtes en fonction de différents âges (7, 14, 28 et 90 jours).

Notons ici que les valeurs indiquées sont une moyenne de six valeurs de résistance, obtenues pour chaque différent âge des éprouvettes testées, correspondant aux six demi-éprouvettes issues de l'essai de traction par flexion trois points. Les courbes obtenues permettent alors de suivre l'évolution de la résistance des pâtes au fil du temps, offrant ainsi une compréhension approfondie de leur performance mécanique à divers stades de maturation.

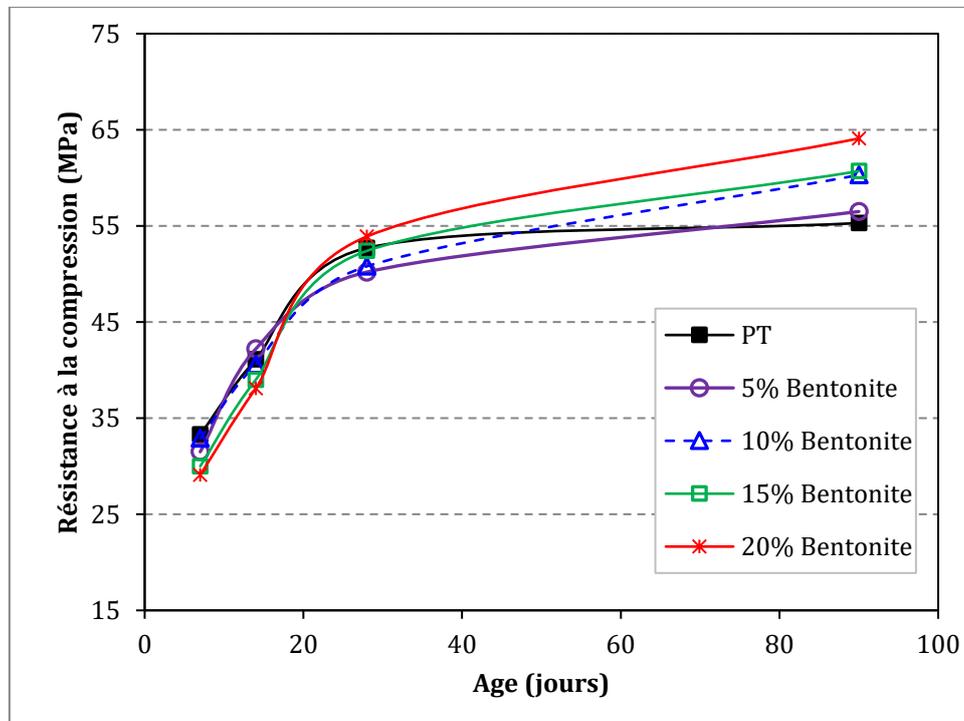


Fig. III-4. Influence de dosage en Bentonite sur l'évolution de la résistance à la compression en fonction de l'âge des pâtes testées.

La **Fig. III-4.** Montre que la pâte témoin (PT) a donné des résistances à la compression relativement supérieure à celle garanti par le producteur de ce type du ciment (CEM I 42,5 N SR3). À l'âge de 28 jours, la résistance de la pâte de référence égale à 53 MPa. L'utilisation d'un adjuvant superplastifiant pour le malaxage a participé certainement à cette augmentation relative en résistance mécanique. Les résultats montrent aussi que l'ajout de la Bentonite influence positivement la résistance à la compression des pâtes étudiées, notamment à long terme. Au jeune âge (à 7 jours), les résistances à la compression des différentes pâtes (avec ou sans Bentonite) ne peuvent être bien distinguées, mais il est quand même remarquable qu'à l'âge de 7 et de 14 jours, les pâtes contenant 5 % et 10 % de Bentonite donnent des valeurs de résistance presque identiques à celles obtenues dans le cas de la pâte témoin (PT), par contre, les valeurs de résistance enregistrées dans le cas des pâtes avec une

teneur de 15 et 20 % de Bentonite sont relativement plus faible par rapport à la pâte testée sans Bentonite (PT). Cela est expliquée par le fait qu'au jeune âge, avec l'ajout une argile Bentonite, moins de liaisons chimique (C-S-H) sont produite dans le matériau cimentaire quand le dosage en argile Bentonite est important. Cette Bentonite, connue par son gonflement et sa grande capacité absorbante peut même empêcher l'hydratation d'une partie des particules du ciment à l'intérieur de la pâte. Ce n'est qu'à l'âge de 28 jours qu'on peut confirmer qu'une activité pouzzolanique de la poudre Bentonitique calcinée est déclenchée (voir la **Fig. III-4.**) conduisant progressivement à une élévation en résistance mécanique. À l'âge de 90 jours, la résistance à la compression de la pâte témoin est égale à 55,3 MPa pendant qu'elle est égale à 56.3, 56.7, 60.3 et 64.1 MPa, respectivement pour les pâtes contenant 5, 10, 15 et 20 % de la Bentonite calcinée.

L'exposition de la Bentonite finement broyée à une calcination pendant 3 heures à 750 °C a donc permis à une réactivité dans les pâtes à base de la Bentonite à long terme. Par conséquent, plus de liaisons chimiques et une formation supplémentaire de CSH est produite dans la pâte en durcissement au-delà de l'âge de 28 jours. Cette forte teneur en CSH à long terme dans les pâtes à base de la Bentonite calcinée (dépendant de son dosage dans l'éprouvette testée), conduit certainement une élévation en résistance mécanique à la compression (et en parallèle à la traction (voir les **Figs. III-3. Et III-4.**).

Sans oublier, en plus de l'effet de l'adjuvant superplastifiant, la grande finesse de la Bentonite utilisée (4980 cm²/g) a certainement participé aussi à ces valeurs élevées en résistance mécanique, que ce soit pour la résistance à la compression ou pour la résistance à la traction indiquée déjà plus haut. Car l'ajout d'une poudre très fine (et à caractère réactif) peut non seulement réagir avec les composantes chimiques du ciment et créer de nouveaux gels, mais aussi, cette finesse élevée de l'ajout utilisé conduit à une réduction de la porosité ouverte dans le matériau durci, et par conséquent, à une augmentation en résistance mécanique qui est très gouvernée à l'origine par la quantité de vide dans le matériau: plus la porosité est faible (le matériau est plus compacte), plus la résistance mécanique est élevée.

III.4 INFLUENCE DE LA BENTONITE CALCINÉE SUR LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUE DE LA PÂTE CIMENTAIRE À L'ÉTAT DURCI

III.4.1 Résultat de la Sorptivité capillaire

L'absorption capillaire, appelée aussi "Sorptivité capillaire", est la tendance du matériau cimentaire à prendre de l'eau en l'absence d'une pression hydraulique externe. Ceci est censé se produire presque totalement dans les pores capillaires en dehors du gel (dans la porosité

ouverte et interconnectée). C'est grâce à la tension superficielle que l'eau liquide est tirée dans ces pores. Alors, la Sorptivité traduit l'échange à l'interface eau-pâte cimentaire sans rendre compte de la profondeur de pénétration de l'eau [18].

L'absorption est le mécanisme principal par lequel le matériau cimentaire sec, ou partiellement sec, prend l'eau. À partir de la littérature, plus les pores sont petits, plus l'aspiration est grande.

Les **Fig. III-5. Et III-6.** Présentent, respectivement, pour deux âges différents (à l'âge de 14 jours et de 90 jours), l'évolution de la quantité d'eau absorbée par les différentes éprouvettes de pâtes testées (avec différents dosages en Bentonite), en fonction de la racine carrée du temps. Nous rappelons ici que les mesures des quantités d'eau absorbée ont été enregistrées par pesées effectuées à 5, 10, 15, 30, 60 et 120 minutes (plus de détails sont donnés dans le chapitre II concernant cet essai). Notons aussi que chaque point indiqué sur les courbes représentées dans les **Figs. III-5. Et III-6.** Correspond à la moyenne arithmétique des mesures prises sur trois éprouvettes identiques de dimensions $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ (voir la **Fig. II-17.**). Ceci permet d'avoir des résultats plus fiables en minimisant les variations dues à des anomalies individuelles des échantillons.

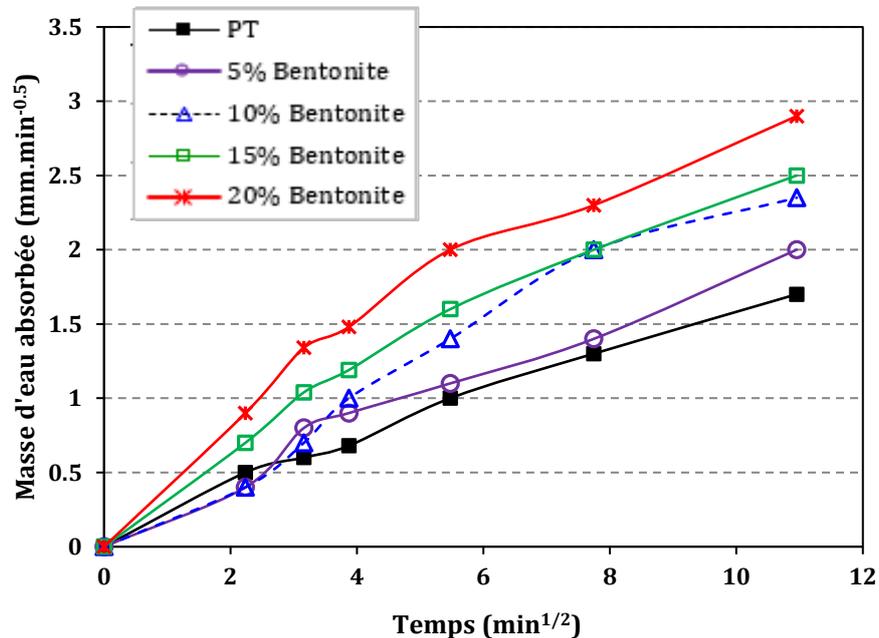


Fig. III-5. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine Carrée du temps des pâtes testées à l'âge de 14 jours.

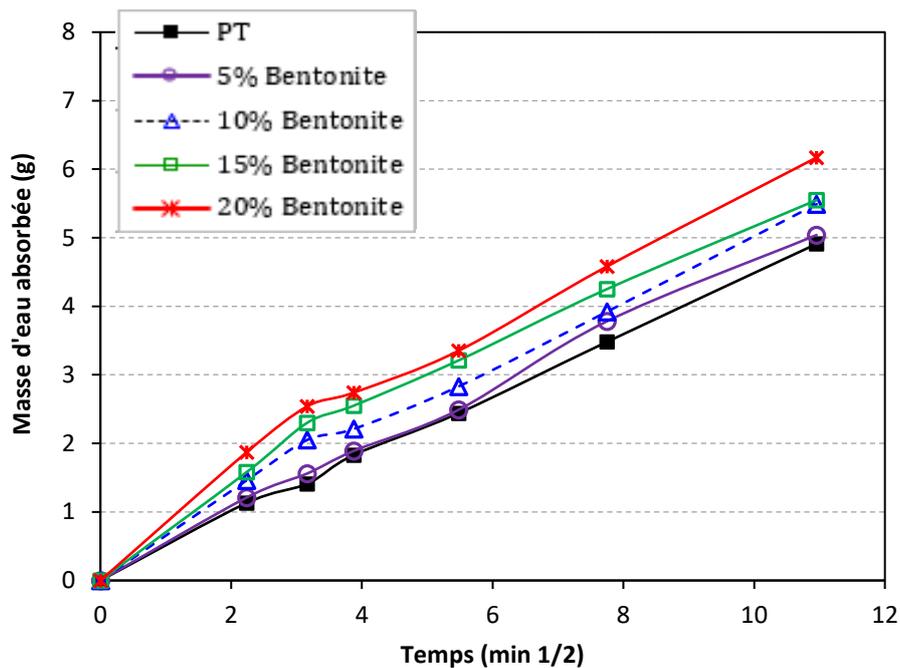


Fig. III-6. Evolution de la masse d'eau absorbée en fonction de la racine Carrée du temps des pâtes testés à l'âge de 90 jours.

D'après les Figures ci-dessus (**Figs. III-5. Et III-6.**) les quantités d'eau absorbées par des pâtes testés (à 14 et à 90 jours) augmentent proportionnellement en fonction du temps. Les données révèlent donc une relation croissante entre ces deux variables, Cette tendance uniforme indique que leur d'absorption des pâtes suit un modèle prévisible, Ce qui peut être très utile pour évaluer leur performance et leur durabilité à long terme.

Les résultats obtenus montrent que la masse d'eau absorbée par la pâte PT (sans Bentonite) est relativement inférieur à celle absorbée par les pâtes cimentaires avec différentes teneurs en Bentonite (**Figs. III-5. Et III-6.**). Il est clairement observé que plus le dosage en Bentonite, plus l'absorption du matériau est importante. Ceci est expliqué par la grande finesse de la Bentonite (supérieure à celle du ciment), qui peut augmenter l'absorption capillaire dans la structure poreuse (des pores capillaires) du matériau, modifiées par la grande finesse de la Bentonite ajoutée. Comme il est déjà cité plus haut : plus les pores sont petits, plus l'aspiration est grande. Cette évolution est constatée dans les deux cas présentés (pour les deux âges étudiés (à 14 et à 90 jours)).

Par ailleurs, la grande capacité absorbante de l'argile Bentonite (avec un coefficient de gonflement qui atteint jusqu'à 7 fois son volume à l'état brute) participe certainement à cette augmentation en volume d'eau absorbée, malgré que des faibles dosages sont utilisés et malgré qu'elle subît un traitement thermique. Ce qui nous pousse à dire que les quantités de

l'eau absorbées aurait pu beaucoup plus élevée si la Bentonite a été utilisé sans un traitement thermique (sans calcination).

En outre, il est important de noter aussi que les quantités d'eau absorbées par des éprouvettes à l'âge de 90 jours (**Fig. III-6.**) sont nettement supérieures à celles absorbées par des éprouvettes à l'âge de 14 jours (**Fig. III-5.**). Cela ne peut être expliqué que par le fait que la Bentonite calcinée utilisée (réactif) conduit à une formation supplémentaire de produits CSH à l'âge de 90 jours à cause de l'activité pouzzolanique qui se produit à long terme et qui rend le matériaux plus compacte (avec une porosité plus faible). Par conséquent, les éprouvettes testées à l'âge de 90 jours absorbent des quantités d'eau plus importante.

Sans oublier, le gonflement, par lequel l'argile Bentonite est très connue, est considéré comme un paramètre important qui peut influencer sur l'absorption capillaire de la pâte cimentaire. Malgré que la capacité gonflante de la Bentonite utilisée dans cette étude expérimentale est très limité, suite au traitement thermique qu'elle a subi (calcination), mais les deux phénomènes contradictoires, de gonflement et de retrait (retrait du ciment), ont permis d'avoir des éprouvettes à l'état durci (à base de la Bentonite), plus compactes que les éprouvettes témoins. L'apparition des fissures est dans ce cas empêchée et la sorptivité du matériau reste plus élevée à l'âge de 90 jours.

- **Détermination de coefficient de sorptivité capillaire**

Le coefficient de sorptivité caractérise la capacité d'absorption des différentes pâtes testées dans le temps. Les résultats présentés sur les **Figure III-7.** Sont obtenus par application de l'équation ($x = \sqrt{S^2 t}$). Autrement dit : c'est la profondeur de pénétration de l'eau absorbée (en hauteur), divisée par la racine carrée du temps.

Les résultats montrent qu'à l'âge de 14 jours, les pâtes à base de la Bentonite calcinée représentent les coefficients d'absorptions les plus élevées par rapport à la pâte témoin, dont les valeurs de coefficient de l'absorption capillaire est égal à 0.114, 0.134, 0.143 et 0.165 mm/min^{0.5}, respectivement pour les formulations avec 5, 10, 15 et 20 % de Bentonite. Donc, le coefficient de sorptivité augmente avec l'augmentation de dosage utilisé en Bentonite. La même tendance de cette évolution est observée aussi dans le cas des pâtes à l'âge de 90 jours. Pendant que le coefficient de sorptivité capillaire est égal à 0.28 dans le cas de la pâte de référence (PT), les valeurs de ce coefficient sont en progression en fonction de dosage de la Bentonite et qui égalent à 0.287, 0.313, 0.316 et 0.352, respectivement pour les pâtes avec 5, 10, 15 et 20 % de Bentonite.

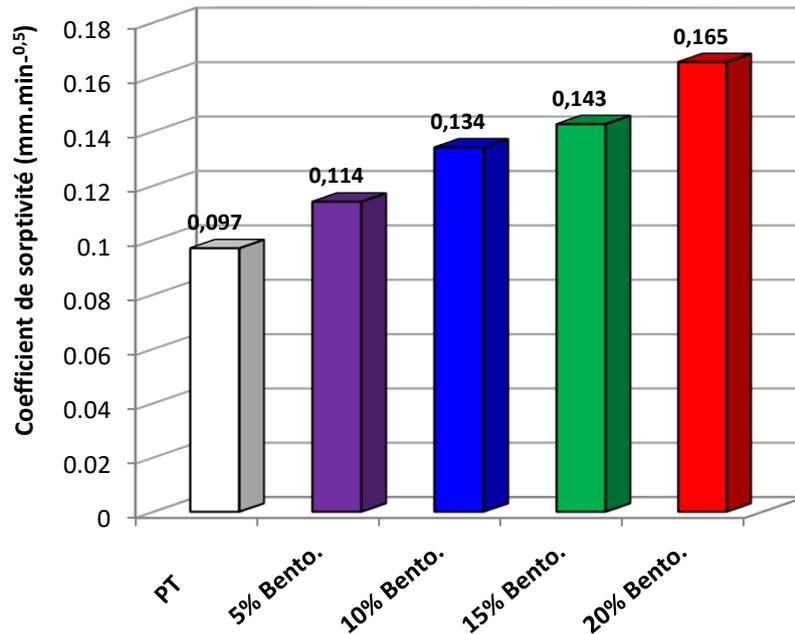


Fig. III-7. Evolution de coefficient la sorptivité capillaire de la pâte testée à l'âge de 14 jours.

À partir de ces figures, nous pouvons observer clairement que la quantité d'eau absorbée par les éprouvettes de pâte augmente en fonction du pourcentage de bentonite. Lorsque la pâte ne contient pas de bentonite (0%), la sorptivité est de 0,0969. En ajoutant 5% de bentonite, la sorptivité augmente à 0,1141. Avec 10% de bentonite, elle atteint 0,1340, et continue d'augmenter à 0,1426 avec 15% de bentonite. Enfin, à 20% de bentonite, la sorptivité monte à 0,1654.

Ces valeurs montrent une tendance croissante, ce qui indique que la capacité d'absorption d'eau de la pâte s'accroît avec l'augmentation du pourcentage de bentonite.

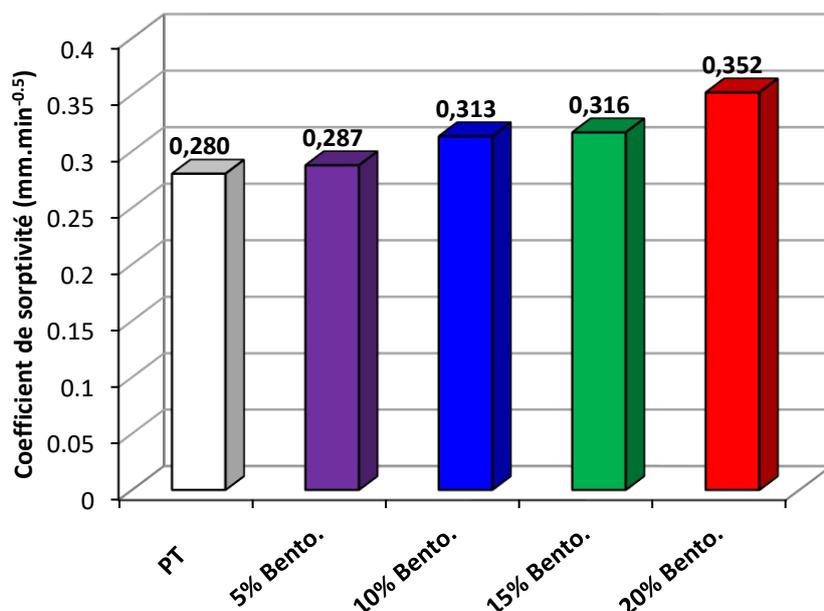


Fig. III-8. Evolution de coefficient la sorptivité capillaire de la pâte testée à l'âge de 90 jours.

III.4.2 Résultat de Retrait total

À cause de la taille d'éprouvettes testées qui rend la dessiccation plus favorable, le retrait total évolue très rapidement pour toutes les formulations étudiées. Nous rappelons que les mesures de retrait ont été effectuées seize fois, depuis l'âge de deux jours (après 48H) et jusqu'à l'âge de 90 jours, pour les cinq différentes formulations du pâte testées. Les résultats présentés ci-dessous dans la **Fig. III-9**. Correspondent à la moyenne arithmétique de trois mesures de retrait effectuées sur trois éprouvettes pour chaque pâte testée.

Il est clairement observé sur la **Fig. III-9**. qu'au jeune âge (inférieur à une semaine) le retrait est presque indépendant de la composition de la pâte. Alors, l'effet de la Bentonite utilisée ne se manifeste qu'après la première semaine de conservation (de séchage à l'air libre). Après le septième jour, le retrait du pâte témoin (PT) évolue beaucoup plus rapidement et se distingue de ceux contenant de la Bentonite calcinée jusqu'à l'âge de trois mois. Cette diminution de retrait des pâtes contenant de la Bentonite calcinée (plus prononcée après la première semaine), est généralement expliquée par l'effet filler joué par la Bentonite traitée et par la qualité des pores à long terme après le déclenchement de sa réactivité qui conduit à une teneur élevée en CSH. Notons aussi que le retrait endogène (retrait à l'intérieur du matériau et qui participe clairement dans la diminution de retrait final) est influencé par l'évolution de l'hydratation et la dessiccation interne due à la consommation d'eau par le processus chimique de la formation des hydrates. Cette dernière qui pourrait être plus accélérée en

provoquant un retrait plus important même au jeune âge (durant la première semaine). Ceci aura pu être certainement plus remarquable dans le cas des dosages plus élevée en bentonite calcinée.

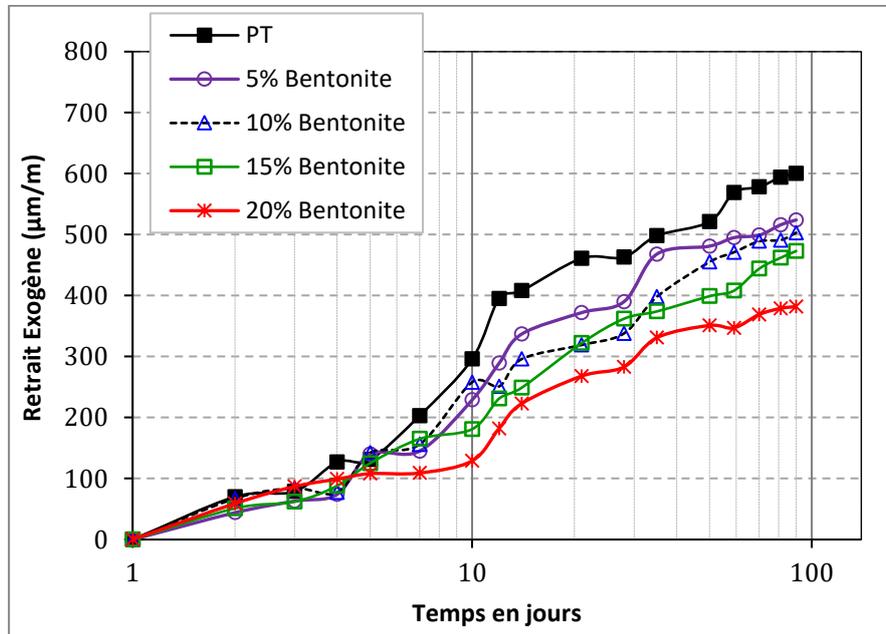


Fig. III-9. Evolution du retrait total des pâtes à base de la Bentonite calcinée.

Les résultats obtenus montrent qu'après une semaine de conservation (en contact avec le milieu extérieur), la pâte témoin (sans Bentonite) représente une supériorité en retrait par rapport aux autres pâtes contenant l'argile Bentonite. La **Fig. III-9.** Montre une importante déformation de la pâte témoin dépassant celle remarquée dans le cas des pâtes à base de la Bentonite calcinée. La présence de la Bentonite fait diminuer le retrait de la pâte dépendant de dosage utilisé en Bentonite. A long terme, l'argile Bentonite a donc un effet significatif sur le retrait final de la pâte tel qu'on obtient après trois mois d'observation 600, 524, 503, 473 et 382 $\mu\text{m}/\text{m}$ pour la pâte de référence (PT) et ceux contenant, respectivement, 5, 10, 15 et 20 % de la Bentonite calcinée.

Après la première semaine (à long terme), la pâte à la Bentonite devient moins poreuse avec des pores plus affinés à cause d'une formation supplémentaire de produits CSH, empêchant ainsi la dessiccation ce qui conduit à une diminution en retrait. En effet, le retrait dans notre cas est non seulement limité par une teneur relativement élevée en CSH qui est due à une activité précoce de la Bentonite "calcinée", mais aussi à son effet expansif, puisque la Bentonite fait partie des argiles Smectites avec un taux élevé en Montmorillonite (dépassant les 60 %). Sa structure en feuillets (la Montmorillonite telle qu'elle est expliquée dans le

premier chapitre de ce document) et l'espace inter-foliaire entre ces feuillets qui est occupé par des cations hydratés (Na^+ et Ca^{2+}) et des molécules d'eau responsables du pouvoir gonflant de la Bentonite. Il est important de noter ici que la calcination appliquée sur la Bentonite étudiée de la région de Maghnia (la Maghnite) a conduit à une diminution de ce gonflement, permettant ainsi de garder l'éprouvette ($4 \times 4 \times 16$) cm^3 dans sa bonne forme (éprouvettes non fissurée ou même éclatée). Nous pensons alors que si l'argile Bentonite utilisée dans la pâte testée dans cette étude n'a pas été traitée thermiquement (non calcinée), les résultats du retrait auraient pu être très différents de ceux représentés dans la **Fig III-9**, car l'utilisation de la Bentonite naturelle (sans calcination), avec son pouvoir très gonflant, pourrait conduire à une fissuration très importante du matériau cimentaire et peut être même à l'éclatement de l'éprouvette prismatique, notamment dans le cas des dosages élevés en Bentonite. Comme perspective, une étude de comparaison entre l'influence de la Bentonite brute (non traitée thermiquement) et la Bentonite calcinée (à des températures différentes) sur l'évolution de retrait total d'un matériau cimentaire sera donc très importante.

III.4.3 Corrélation entre la résistance mécanique à la compression et le retrait des pâtes étudiées à l'état durci.

Dans cette partie, nous avons essayé d'établir une relation entre l'évolution de retrait total des pâtes cimentaires étudiées (qui est une caractéristique physique déterminée à l'état durci), et l'évolution de la résistance à la compression (une propriété mécanique) déterminée à différents âges de durcissement. Cette relation a été vérifiée pour des éprouvettes de pâte à l'âge de 7, 28 et 90 jours, tout en donnant un intérêt majeur à l'influence des différents dosages utilisés en Bentonite de Maghnia. Alors, sur la **Fig. III-10**. Cinq courbes sont tracées correspondant aux cinq différents dosages de la Bentonite (0 %, 5, 10, 15 et 20 %), dont trois points sont utilisés pour tracer chacune des courbes, correspondant aux trois différents âges de durcissement (7, 28 et 90 jours).

Les résultats illustrés sur la **Fig. III-10**. Montrent que la résistance à la compression de la pâte cimentaire à base de la Bentonite peut être estimée correctement à l'aide d'une fonction linéaire, à partir des résultats retrait total évalué expérimentalement pour les mêmes âges du matériau (âge de durcissement). Avec des coefficients de régression linéaire (R^2) supérieurs ou égal de 0.9, les résultats expérimentaux obtenus s'ajustent donc presque parfaitement avec les fonctions mathématiques linéaires données pour chaque différent dosage en Bentonite calcinée. Ces relations mathématiques linéaires sont comme suit :

- Pour la pâte témoin : $R_c = 0.057 (r) + 22,6 (R^2 = 0,94)$
- Pour la pâte avec 5 % de Bentonite : $R_c = 0.067 (r) + 22,3 (R^2 = 0,98)$
- Pour la pâte avec 10 % de Bentonite : $R_c = 0.079 (r) + 21,6 (R^2 = 0,97)$
- Pour la pâte avec 15 % de Bentonite : $R_c = 0.091 (r) + 18,1 (R^2 = 0,99)$
- Pour la pâte avec 20 % de Bentonite : $R_c = 0.112 (r) + 21,4 (R^2 = 0,99)$

Malgré que les évolutions entre le retrait total des pâtes testées et leurs résistances à la compression sont avec une même tendance (une relation linéaire), et que le retrait de chaque pâte cimentaire peut déduire correctement à partir des résultats de la résistance à la compression pour un âge de durcissement donné, mais, d'après les courbes et les équations indiquées sur **Fig. III-10**, il est impossible de donner une seule et même loi de comportement pour tous les différents dosages de Bentonite utilisés.

Il est bien clair que le coefficient entre la valeur de la résistance mécanique et la valeur du retrait est en croissance progressive (augmente relativement) quand le dosage en Bentonite utilisé dans la pâte cimentaire augmente aussi.

Nous rappelons ici que la Bentonite, avec son effet réactif, a permis d'avoir une évolution différente (plus croissante) à long terme (au-delà de l'âge de 28 jours), la chose qui nous a peut-être poussé de ne pas prendre les valeurs expérimentales obtenues à l'âge 14 jours, Ceci nous laisse penser qu'une corrélation entre les résistances mécaniques et les retraits mesurés à long terme (qu'au-delà de 28 jours), auraient pu donner des résultats plus identiques que ceux indiqués sur la **Fig. III-10**.

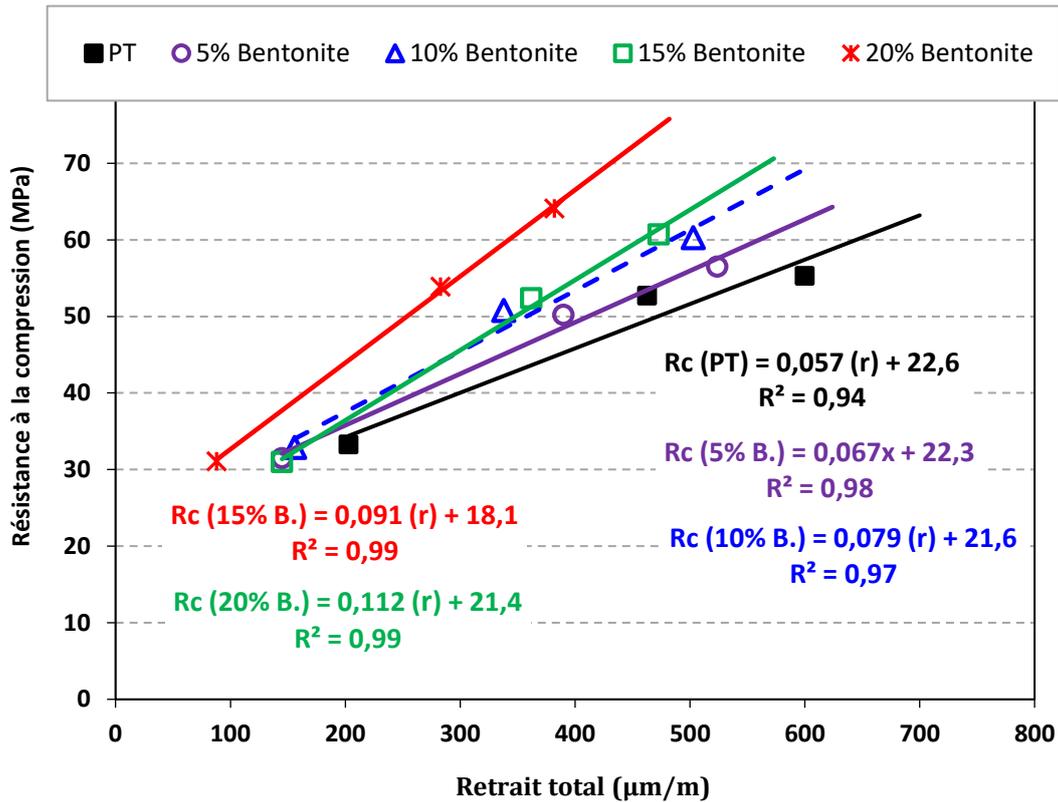


Fig. III-10. Relation entre la résistance à la compression et le retrait total des différentes pâtes cimentaires étudiées.

III.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre, plusieurs analyses des résultats expérimentaux obtenus, que ce soit à l'état frais ou durci, ont été présentés et discutés, afin de valoriser la Bentonite de Maghnia (finement broyée et calcinée) en tant qu'ajout minéral (ajoutée par substitution d'une quantité du ciment) à une pâte ordinaire modifiée avec un adjuvant superplastifiant. Les résultats expérimentaux de cette étude offrent un aperçu détaillé de l'impact de la Bentonite étudiée sur diverses propriétés de pâtes cimentaires, fournissant des informations essentielles pour optimiser leur performance et leur durabilité.

Les discussion des résultats expérimentaux ont révélé, dans ce chapitre, que l'ajout de la Bentonite, étudié dans ce travail de recherche, peut être très utiles et même bénéfique pour certaines propriétés des pâtes cimentaires ordinaires, sauf qu'il était difficile, dès le début de cette étude, de tester ce genre de pâtes (à base de la Bentonite), sans l'utilisation d'un adjuvant superplastifiant, qui permettra à la préparation (confection) des pâtes avec de forts dosages en

Bentonite (allant à plus de 20 %). Nous rappelons ici, que l'utilisation de l'adjuvant a permis de tester des pâtes avec la même classe de maniabilité (très plastique).

A l'état frais, les résultats obtenus ont montré que plus le dosage en Bentonite est élevé, plus le temps de maniabilité de la pâte testée est important. Cependant, à l'état durci, la bentonite joue un rôle crucial dans l'absorption d'eau par capillarité. À l'âge de 14 jours, le coefficient de sorptivité capillaire augmente de manière significative avec le pourcentage de la Bentonite, atteignant un maximum de 0,165 pour 20% de bentonite. Cette tendance se poursuit jusqu'à 90 jours, où les pâtes avec 20% de Bentonite affichent une sorptivité capillaire élevée de 0,352, démontrant une capacité d'absorption d'eau avec le temps.

En termes de résistance, la Bentonite améliore la résistance à la traction et à la compression des pâtes, surtout à long terme (à cause de sa réactivité pouzzolanique, une fois calcinée), avec des valeurs maximales observées pour des dosages de 20% de Bentonite. À l'âge de 90 jours, par exemple, la résistance à la compression d'une pâte avec une teneur de 20% en Bentonite a augmenté de 18.96% par rapport à celle obtenue à l'âge de 28 jours, en comparaison de la croissance en résistance dans le cas de la pâte témoin qui a augmenté seulement de 4.93% entre l'âge de 28 et de 90 jours.

Enfin, dans ce chapitre un intérêt majeur a été donné particulièrement à l'analyse des résultats de retrait, qui a un effet direct sur la stabilité et par conséquent sur durabilité du matériau cimentaire étudié. Alors, l'impact de la Bentonite calcinée de Maghnia sur le retrait total (endogène et exogène) des pâtes était très remarquable : à l'âge de trois mois, les pâtes contenant de la Bentonite montrent une diminution significative du retrait par rapport à la pâte témoin, indiquant une meilleure stabilité dimensionnelle. L'effet bénéfique de la Bentonite est accentué par le processus de calcination, qui limite le gonflement et les fissurations. Dans l'ensemble, ces résultats démontrent que l'ajout de Bentonite, particulièrement lorsqu'elle est finement broyée et calcinée, améliore non seulement la résistance et la durabilité des pâtes cimentaires mais aussi leur comportement physique en termes d'absorption d'eau et de retrait, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour le développement des matériaux de construction plus performants et plus stables.

Conclusion générale

Cette étude a examiné l'impact de l'ajout de bentonite calcinée sur les propriétés physiques et mécaniques des pâtes cimentaires, notamment en termes de maniabilité, résistance à la traction, résistance à la compression, retrait, absorption d'eau et sorptivité capillaire.

Les résultats expérimentaux montrent que l'ajout de bentonite calcinée influence significativement les caractéristiques des pâtes cimentaires. En particulier, l'augmentation du dosage de bentonite entraîne une augmentation du temps de maniabilité des pâtes, en raison de sa capacité absorbante élevée et de sa grande finesse. Cependant, cette modification peut être modérée par l'utilisation d'adjuvants superplastifiants, qui facilitent l'écoulement et réduisent la viscosité du matériau.

Concernant la résistance mécanique, une tendance positive a été observée avec l'augmentation du dosage en bentonite. Bien que les pâtes contenant bentonite présentent des résistances à la traction et à la compression inférieures à celles de la pâte témoin au début du durcissement, une amélioration significative est observée à long terme, notamment au-delà de 28 jours. Cette amélioration est attribuée à la réactivité pouzzolanique de la bentonite calcinée, qui favorise la formation de produits CSH et augmente la résistance du matériau.

En ce qui concerne le retrait, l'ajout de bentonite réduit le retrait des pâtes cimentaires, particulièrement au long terme, en limitant la dessiccation grâce à la formation de CSH supplémentaires et à l'effet expansif modéré de la bentonite. La calcination de la bentonite joue un rôle crucial en réduisant son potentiel de gonflement excessif, évitant ainsi des fissurations importantes dans les éprouvettes.

Les résultats d'absorption d'eau et de sorptivité capillaire montrent également une tendance croissante avec l'augmentation du dosage de bentonite, en raison de sa grande finesse et de sa capacité absorbante élevée. Ces propriétés influencent la performance à long terme des matériaux cimentaires.

Enfin, bien que la corrélation entre la résistance mécanique et le retrait soit généralement positive, elle varie en fonction du dosage de bentonite, et une loi de comportement unique ne peut pas être appliquée à toutes les formulations. Les résultats suggèrent que des analyses plus approfondies, en particulier à long terme, pourraient offrir une meilleure compréhension des interactions entre les propriétés mécaniques et le retrait des pâtes cimentaires modifiées par bentonite

Références

[1] <https://www.infociments.fr/ciments/>

[2] [ZENNOUCHE Abdenour ben MAHFOUD Chouaib.pdf](#)

(Le composant de base des ciments actuels est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium)

[3] https://dspace.univ-guelma.dz/jspui/bitstream/123456789/14747/1/SELLAOUI_CHAREF_EDDINE_F1.pdf

[4] <https://dspace.univ-eloued.dz/bitstreams/55d97ced-f2e5-4252-b69f-83d4e959dd47/download>

[5] <http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-ciment-portland/>

[6] http://thesis.univ-biskra.dz/4195/1/M%C3%A9moire_Magister_BANNI_Razika.pdf

[7] http://dspace.univ-ghardaia.dz:8080/jspui/bitstream/123456789/6509/1/m%C3%A9moire_ABD_EL_ALI_%2BDINE_S.pdf

[8] <https://fr.scribd.com/document/634180176/Ch-04-Les-adjuvants>

[9] Acker P., "Comportement mécanique du béton : Apports de l'approche physico-chimique", Rapport de Recherche LPC, N°152, Juillet 1988, 122p.

[10] Baron J., "Les retraits de la pâte du ciment", dans, "Le béton hydraulique : connaissance et pratique", Presses des ENPC, 1982, pp.485-502.

[11] Sellevold E.J., Nilsen T., "Les fumées de silice condensées dans la fabrication du béton: une étude mondiale", dans, "Matériaux supplémentaires en cimenterie", CANMET, 1987, pp.183-273.

[12] Mehta P.K., "Pouzzolanes naturelles", dans, "Matériaux complémentaires en cimentation", Editeur V.M. Malhortra, 1987. pp.3-38.

[13] Mehta P.K., "Pozzolanic and cementitious by-products in concrete: Another look", Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference on fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, 1989, pp.1-43.

[14] Jianyong L., Yan Y., "A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete", Cement and Concrete Research, Vol 31, N°8, 2001, pp.1203-1206.

[15] Katri R.P., Sirivivatnanon V., Gross W., "Effect of different supplementary cementitious materials on mechanical properties of high performances concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol 25, N°1, 1995, pp.209-220

[16] Chen J.C., Chan Y.W., "Effect of temperature and humidity conditions on the strength of blast furnace slag cement concrete", *Proceedings of the 3th CANMET/ACI International Conference of fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete*, Trondheim, Norway, 1989, pp.1377-1397.

[17] Chindaprasirt P., Homwuttiwong S., Sirivivatnanon V., "Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulphate resistance of blended cement mortar", *Cement and Concrete Research*, Vol 34, N°7, 2004, pp.1087-1092.

[18] M. Lion, "Etude du lien entre sorptivité et capillarité pour différents types de bétons," *Congrè Français Mécanique 2019*, 2019.

