



N°d'ordre :

UNIVERSITE DE M'SILA

FACULTE DES SCIENCES ET DES SCIENCES DE L'INGENIORAT

Département de génie civil

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité : Génie Civil

Option : Matériaux

Par

Chikouche Mohamed Aziz

SUJET

Effet des ajouts à base d'argiles gréseuses et vaseuses sur les propriétés des matériaux cimentaires

Soutenu publiquement le 16 / 04 / 2008 devant le jury composé de :

Aït Tahar Kamel	Prof. Université de Tizi Ouzou	Président
Bibi Mekki	M.C Université de M'sila	Rapporteur
Beddar Miloud	M.C Université de M'sila	Examineur
Zeghichi Leila	M.C Université de M'sila	Examineur
Dehmous Hocine	M.A.C.C Université de M'sila	Membre

Promotion : 2007/2008.

Remerciements

Ce n'est pas qu'il est difficile de remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ce travail, mais il faut avouer que les formules sont nombreuses et que le choix des bons mots a été toujours difficile. Entre vifs, sincères, profonds et je passe les obscures subtilités de la langue française, le choix de la formule de remerciements est difficile.

Je commencerais par remercier dieu tous puissent, de m'avoir donné le courage et l'optimisme de finir ce travail, et sincèrement remercier ceux qui ont accepté de juger ce travail. Je tiens tout d'abord à remercier Monsieur le Professeur Aït Tahar Kamel, de l'université de Tizi Ouzou d'avoir accepté de présider le jury, Monsieur Beddar Miloud et Madame Zeghichi Leila, Maîtres conférences à l'université de M'sila, d'avoir accepté d'examiner ce travail, et bien sûr Monsieur Dehmous Hocine, Maître Assistant à l'université de M'sila, d'être un membre de ce jury.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon encadreur, Monsieur Bibi Mekki, Maître conférence au département génie civil de l'université de M'sila, qui sans sa patience, générosité et surtout discipline, cette thèse n'aurait vu le jour.

Je tiens à remercier tous les professeurs, qui depuis mon introduction au génie civil ont contribué de près ou de loin à ma formation, en commençant par le président du conseil scientifique Monsieur Khemissa M. et Monsieur(s), Rahmouni Z., Bencheikh M., Zitouni S., Nacéri Abd-El-G., Amour A., Benkadja R., Safer S., Boudaoud Z., Belouahri B., Belagraa L., Hamituouche A., le responsable du laboratoire Monsieur Lounis Abd El-K., Mme Bakir N., et Monsieur Bouaatrous que dieu est pitié de son âme.

Sans oublier le staff des laboratoires de qualité de l'usine Sour El-Ghozlane Monsieur(s) Hellal M., Kassi, Hesni A., et bien sûr Anissa, pour leur soutien. Les responsables des laboratoires SETIM Madame Sahraoui, Monsieur Bellal et Saoud. Monsieur(s) Magnouche et Bouterfaya au CRND de Draria.

Je tiens à exprimer mon immense gratitude à mes parents, mes frères, ma sœur et l'ensemble de mes proches, pour leur soutien permanent et leur encouragement tout au long de ces années, sans lesquels je n'aurais jamais mené à bien ce travail.

Sommaire

Titre	Page
ملخص	
Résumé	
Abstract	
Introduction générale	09
Chapitre 1 : Le ciment	12
I -Le ciment Portland.....	12
I-1-Le ciment portland artificiel	12
I-1-1- Composition chimique du clinker.....	12
I-2-Le ciment portland composé	13
I-2-1-Constituants principaux des ciments.....	14
I-2-1-1-Laitier granulé de haut fourneau	14
I-2-1-2-Pouzzolanes.....	14
I-2-1-3-Cendres volantes	14
I-2-1-4-Schistes calcinés	15
I-2-1-5-Calcaires	15
I-2-1-6-Fumées de silice	15
I-3-Avantages fonctionnels, économiques et écologiques	15
I-3-1-Bénéfices fonctionnels.....	15
I-3-2-Bénéfices économiques	16
I-3-3-Bénéfices écologiques et environnementaux	16
I-4- Autres types de ciment	16
I-4-1- Ciment de Haut Fourneau CEM III.....	16
I-4-2- Ciment pouzzolaniques CEM IV.....	16
I-4-3- Ciment composé CEM V	16
I-5-Hydratation du ciment portland.....	18
I-5-1-Théorie de durcissement et de prise.....	19
I-5-1-1-La théorie cristalloïdale.....	19
I-5-1-2-La théorie colloïdale.....	19
I-5-1-3-La théorie mixte.....	20
I-6-Le broyage.....	20
I-6-1-Les paramètres opérationnels affectant le procédé de broyage.....	21
I-7-Le retrait.....	21
Chapitre 2 : L'argile et la calcination	22
II-1-Les minéraux argileux.....	22
II-1-1-Les illites.....	22
II-1-2-Les montmorillonites.....	22
II-1-3-Le kaolin.....	22
II-2-Les roches argileuses.....	23
II-2-1-Les argiles de la zone d'altération météorique.....	23
II-2-2-Les argiles de la zone de sédimentation.....	23
II-3 - Qu'est ce qu'une pouzzolane de synthèse ?	24
II-4-La Calcination.....	24
II-4-1-La calcination flash.....	25
II-4-2- La calcination lente.....	25
III-1- Pourquoi la vase ?	25
III-1-1- Facteurs Physiques.....	26
III-1-2- Facteurs socio-économiques.....	26
III-2-M'sila terre d'argile gréseuse.....	27
III-3-Quel est l'intérêt des matériaux locaux.....	28
IV- Transformation des argiles pendant un traitement thermique.....	29

IV-1-La déshydratation	30
IV-2-La déshydroxylation.....	31
IV-3-La recristallisation.....	31
Chapitre 3 : Etude pratique et analyse des résultats	33
A- Introduction aux essais réalisés	33
I- Diffraction rayon X	33
II- Essais sur ciment anhydre	34
II -1-La finesse de mouture (finesse de Blaine)	34
II-1-1-Conduite de l'essai.....	34
II-2- Masse volumique absolue	35
II-2-1- Conduite de l'essai.....	35
III- Essai sur pâte de ciment	36
III-1- La consistance.....	36
III-1-1-Conduite de l'essai	36
III-2-la prise	37
III-2-1- Conduite de l'essai	37
III-3-Determination de la stabilité	38
III-3-1- Conduite de l'essai à chaud	38
IV- Essai sur mortier	39
IV-1- Malaxage du mortier	39
IV-2-Préparation des éprouvettes	39
IV-3-Conservation des éprouvettes	39
IV-4-Conservation des éprouvettes dans l'eau	40
IV-5- Résistances mécaniques des mortiers	40
IV-5-1-Résistance à la flexion	40
IV-5-2-Résistance à la compression	40
V- Essai sur béton	41
V-1- Dosage en ciment et en eau	41
V-2- Ajustement du dosage en eau	43
B- Essai et analyse des résultats.....	44
I- Analyse des paramètres chimiques des ajouts.....	44
I-1-Analyse minéralogique	44
I-2-Analyse chimique	44
I-3-Analyse thermique différentielle	45
II- Analyse des propriétés des ciments	50
II-1-Analyse des propriétés chimiques des ciments	50
II-2-Analyses des propriétés physiques des ciments	52
II-2-1-Masse volumique	52
II-2-2- Consistance normale	54
II-2-3- La prise	56
II-2-4-L'expansion	56
II-2-5- Résistance mécanique des mortiers	57
III- Analyse des propriétés mécaniques du béton	61
III-1-Caractéristiques des matériaux utilisés	61
III-1-1-Le sable	61
III-1-2-Le gravier	62
III-2-Composition	63
III-3-Résistance mécanique du béton	63
III-4-Modules de déformation	63
Conclusion	67
Annexes	
Bibliographie	

Liste des tableaux

Titre	Page
Tableau 1- Exemple de composition chimique d'un clinker.....	12
Tableau 2 - Les constituants et les additions du ciment.....	13
Tableau 3- Exigences mécaniques et physiques	17
Tableau 4 - Exigences chimiques	17
Tableau 5- Les cinq types des ciments courants et leur composition	17
Tableau 6- Masses molaires, masses volumiques des réactifs et des produits des réactions d'hydratation (à 20° C)	19
Tableau 7- Classification sommaire des minéraux argileux.	23
Tableau 8 - Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.....	41
Tableau 9 -Correction en pourcentage sur le dosage en eau	43
Tableau 10 - Analyse minéralogique des ajouts cimentaires	45
Tableau 11 - Analyse chimique des ajouts cimentaires	45
Tableau 12 - Différentes variantes des ciments étudiées	50
Tableau 13 - Analyse chimique des différentes variantes.....	51
Tableau 14- Analyse granulométrique du sable.	61
Tableau 15- Différentes caractéristiques des granulats utilisés.....	62
Tableau 16 – Analyse granulométrique des granulats de fraction 3/8	62
Tableau 17 – Analyse granulométrique des granulats de fraction 8/16	62
Tableau 18- Composition du béton selon la méthode Dreux-Gorisse	63
Tableau 19- Agglomération des résultats des essais.....	66

Liste des figures

Titre	Page
Figure 1 : Laitier granulé de haut fourneau vu au microscope	14
Figure 2 : Pouzzolane volcanique vu au microscope	14
Figure 3 : Cendre volante vu au microscope	14
Figure 4 : Fumée de silice vu au microscope	15
Figure 5 : Hydratation du grain de ciment	20
Figure 6 : Température du four en fonction du temps.	25
Figure 7 : Matériaux de référence recommandés pour la mesure de la chaleur spécifique.	30
Figure 8 : Exemple d'analyse thermique différentielle d'un kaolin	30
Figure 9 : Mécanisme simplifié de la transformation de la kaolinite en métakaolinite.....	32
Figure 10: Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine.	34
Figure 11 : Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance	37
Figure 12 : Détermination du début de prise	37
Figure 13 : Détermination de la fin de prise	37
Figure 14 : Essai de stabilité avec les aiguilles LE CHATELIER	38
Figure 15 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.....	42
Figure 16 : Analyse minéralogique de la vase	46
Figure 17 : Analyse minéralogique de la marne argileuse rouge	47
Figure 18 : Analyse thermique différentielle de la vase.	48
Figure 19 : Analyse thermique différentielle de la marne argileuse rouge	49
Figure 20 : La masse volumique absolue du ciment en fonction du benzène.	52
Figure 21 : Masse volumique absolue des deux variantes de ciment.	53
Figure 22 : Le volume d'eau requis pour avoir une consistance normale de 6 ± 1 m...	54
Figure 23 : Le rapport E/C pour avoir une consistance normale de 6 ± 1 mm.....	55
Figure 24 : Illustration du temps de prise	56
Figure 25 : Les résistances mécaniques des mortiers à 2 jours	57
Figure 26 : Les résistances mécaniques des mortiers à 7 jours	58
Figure 27 : Les résistances mécaniques des mortiers à 28 jours	59
Figure 28 : Les résistances mécaniques des mortiers à 90 jours	60
Figure 29 : Les résistances mécaniques des bétons à 2 jours.....	64
Figure 30 : Les déformations des bétons à 2 jours.....	64
Figure 31 : Les résistances mécaniques des bétons à 7 jours	64
Figure 32 : Les déformations des bétons à 7 jours.....	65
Figure 33 : Les résistances mécaniques des bétons à 28 jours	65
Figure 34 : Les déformations des bétons à 28 jours.....	65

ملخص

البيئة في تدهور مستمر ، مصانع الاسمنت تستهلك يوميا ملايين الهكتارات من الصلصال والكلس، في المقابل النفايات من مختلف الأنواع أخذت بالتوسع، من بينها الوحل المستخرج من جرف أعماق سد القصب. أما عوامل التعرية والنحت كالأمطار الطوفانية والرياح، ساهمت في ترسب تربة ذو لون أحمر تستعمل لحد الآن لصناعة الخزف المحلي – وبعد إجراء دراسات كيميائية ومعدنية على هذه الأنواع من التربات، أين تم اكتشاف نسب معتبرة من الألمين وأكسيد الجير – أظهرت إمكانية مثيرة للاهتمام لدمجها بالكلنكر، من أجل صناعة الاسمنت.

هذا الدمج سيكون مستحيلا في الحالة الطبيعية، لكن بعد دراسة الخصائص الحرارية ، عن طريق التحليل الحراري المتباين، تم معرفة درجة الحرق التي ينبغي للإضافتين وصولهما، وبالتالي تخفيض نسبة التقلص والقدرة الهيدروليكية للصلصال.

من أجل الحصول على النسب الملائمة للمزيج ، يتم حرق الإضافتين لمدة خمس ساعات ومن ثمة إضافتها للكلنكر، من أجل صناعة اسمنت ، الذي قمنا بإجراء سلسلة من التجارب النموذجية عليه في مصنع سور الغزلان، كالكتلة الحجمية وزمن التماسك ومعرفة المقاومة الميكانيكية في اليوم الثامن والعشرين، وفي مخابر الهندسة المدنية لجامعة المسيلة تمت دراسة الخرسانة الناتجة على الاسمنت.

جميع هذه المراحل تم تحريرها في هذه المذكرة التي تحتوي على ثلاثة فصول. الفصل الأول عبارة عن مقدمة للإسمنت أما الفصل الثاني يتحدث عن الصلصال وأنواعه مع جزء للتعريف بتجربة التحليل الحراري المتباين. الفصل الثالث عبارة عن التجارب التي أخضع لها مختلف أنواع الاسمنت وتحليلها ، للوصول إلى خلاصة البحث أين تمت إعطاء بعض النتائج بالإضافة إلى بعض التطلعات.

Resumé

L'environnement est en constante dégradation, les usines de ciment englouties chaque jour des hectares de terre d'argile ou de calcaire, en parallèle les déchets prennent de plus en plus d'ampleur, parmi ces déchets la vase issue du dragage de barrage K'sob. Autre terre jusqu'ici n'est exploitée que dans des travaux de poteries locale - et après une étude chimique et minéralogique sur ces deux marnes argileuses, elle ont révélées la présence de kaolinite et d'illite, et des proportions non négligeable d'alumine et d'oxyde de calcium -, c'est révélé intéressant de les incorporées avec du clinker, afin de produire du ciment.

Cette incorporation n'est pas immédiate, car il faut passer par une étude thermique différentielle, pour savoir à quel degré il faut calciner ces argiles afin de réduire leur retrait et surtout le pouvoir hydraulique.

Pour arriver aux proportions adéquates des mélanges, et après une calcination pendant cinq heurs les marnes argileuses sont mélangées au clinker, afin de produire des ciments, qui à l'usine de Sour El-Ghozlane, ont passés des séries typiques de caractérisation des ciments comme la masse volumique, le temps de prise et la détermination de leurs classe, et au sein des laboratoires de génie civil de l'université de M'sila une étude destructive sur les bétons.

Toutes ces étapes sont rédigées dans ce mémoire en trois chapitres. Le premier étant une introduction au ciment, le deuxième chapitre est un exposé sur les argiles avec une partie sur l'essai axe qui est l'analyse thermique différentielle. Le troisième chapitre est un mélange d'étude et d'analyse, pour arriver enfin à une conclusion, où nous avons formulé des résultats et donner des perspectives.

Abstract

The environment is in constant deterioration, the plants of cement gulped down every day of the hectares of earth of clay or limestone, in parallel waste takes more and more largeness, among this waste the existent sludge of the dredging of dam K' sob. Other earth exploited only in jobs of local potteries - and after a chemical and mineralogical study on these two clays, which reveals the presence of kaolinite and illite, and of proportions not negligible of alumina and oxide of calcium -, it is revealed interesting of them incorporated with the clinker, to produce some cement.

This enlistment is not immediate, because it is necessary to pass by a differential thermal study, to know in which degree it is necessary to calcine this clay to reduce their shrinkage and especially hydraulic power.

To arrive at the appropriate proportions of miscellany, and after a calcination during five hours the clays are blended in the clinker, to produce cements, which at the plant of Sour El-Ghozlane, passed a typical series of characterization of cements such as the volumique mass, the time of catch and determination of their class, and within the laboratories of civil engineering of the university of M'sila a destroying study on concretes.

All these stages are written in this memo in three chapters. The first being a general introduction to cement the second chapter is an report to clay, and with a party on test center which is the differential thermal analysis. The third chapter is a mixture of study and analysis, to arrive finally conclusion, where we formulated results and give some perspectives.

Introduction générale

Du latin « caementum » qui signifiait « pierre naturelle, non taillée », le ciment est un liant hydraulique, constitué essentiellement de silicates et d'aluminates de chaux, en proportions variables selon les matières premières utilisées. Finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit en réaction au processus d'hydratation. Au cours de l'hydratation, les silicates tricalciques se transforment en silicates de calcium hydratés, après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.

Inventaient et utilisaient par les égyptiens, le ciment est amélioré par les civilisations suivantes avec l'utilisation de la chaux. Plus tard les romains la renforçaient de terre volcanique de Pouzzole, ce qui lui permettait de prendre sous l'eau. Pourtant, la découverte du ciment est attribuée à Louis Vicat. En 1818, il fut le premier au monde à fabriquer, de manière artificielle et contrôlée, des chaux hydrauliques.

Le ciment est un mélange constitué de calcaire (80%) et d'argile (20%), chauffé à haute température (1450°C) dans un four en forme de tube où il circule à proximité d'une flamme de 2000°C, avant d'être refroidi brutalement. La matière extraite du four s'appelle le clinker qui est broyé avec du sulfate de calcium, sous forme de gypse ou d'anhydrite, à raison de 3 à 5 %, c'est la formule classique du ciment dit Portland. D'autres types de ciment sont obtenus par adjonction de différents constituants secondaires.

Les programmes d'investissements du gouvernement algérien plafonneront les 140 milliards de dollars d'ici 2009. Environ 70% de ces investissements sont destinés entre autres à l'extension des infrastructures et à la construction des logements. Le secteur de la construction a enregistré à lui seul une croissance de plus de 7% au cours des deux dernières années. Le but visé est de reconstruire le plus vite possible les infrastructures laissées à l'abandon pendant des longues années : rues, voies ferrées, universités, hôpitaux et logements.

Il est prévu la construction de quelque 65 hôpitaux et de rallonger l'autoroute Est-Ouest qui atteindra une fois achevée 1 200 km. L'extension de l'aéroport et du métro est également inscrite en caractères gras sur la liste des priorités. La capitale se verra bientôt dotée d'un nouveau port. Près de 2 milliards de dollars seront au total débloqués pour les travaux d'extension des ports d'ici 2015.

Ces programmes sont liés de près ou de loin à l'industrie du ciment qui est dans notre pays en pleine croissance comme tous les autres secteurs. Les trois groupes industriels et commerciaux algériens, à savoir l'ERCE, l'ERCC et l'ERCO qui comprennent 12 cimenteries totalisant une capacité de production de 11,5 millions de tonnes/an. Par exemple en 2006, le secteur public a commercialisé 10,8 millions de tonnes. Et avec l'importation de la nouvelle technologie, et la privatisation partielle telles de l'usine Meftah, Sour El Ghozlane, Zahana et Hadjr Soud, à horizon 2009-2010, nous disposerons d'une production qui oscillerait entre 23 et 24 millions de tonnes par an.

Cet essor dans ce secteur demande en premier lieu de la prospection, l'argile et le calcaire doivent être en grandes quantités. Mais la production abusive du clinker doit être ralentie par l'ajout de matériaux secondaires, comme du laitier granulé de haut fourneau ou des cendres volantes par exemple.

Parmi ces matériaux qu'on ajoute au clinker on trouve les pouzzolanes naturelles qui proviennent des roches volcaniques, ou artificielles qui sont obtenues par différentes méthodes, les plus couramment employées sont les cendres volantes des centrales thermiques, les laitiers des hauts fourneaux, les bauxites et les argiles calcinées.

La gestion des déchets est depuis quelques années, l'une des préoccupations des organismes publics. Le recyclage en les intégrant dans des matériaux de construction peut être une solution au problème ce qui à pour conséquence la réduction, voir même la suppression à long terme de la mise en décharge.

Des grandes efforts ont été déployés en Algérie dans la réalisation des barrages, mais malheureusement le pays figure parmi les plus négativement touchés par l'érosion et l'envasement. Des opérations de dragage sont épisodiquement programmées, coûteuses mais indispensables, les matières issues ont causées de nombreux dégâts à l'environnement.

Afin d'absorbées ces boues, trois grandes filières peuvent relever le déficit:

* La valorisation : chaque fois qu'elle est possible, confère aux produits une valeur incontestable. Citons notamment les épandages, dont ceux en agriculture, la création de nouveaux espaces et terrains, la réhabilitation de sol de qualité insuffisante, ou encore la réutilisation en B.T.P et construction (remblais, digues, création d'agrégats de type céramique,...).

* Le dépôt : il s'agit d'un procédé classique, soit le régalage (qui consiste à épandre les produits de dragage sur une bande de terre), soit la mise en dépôt sur des terrains retenus.

* Les traitements : qui nécessitent une bonne connaissance de la composition physico-chimique des boues. Il existe plusieurs filières des « pré-traitements » (déshydratation, criblage, lessivage, séparation par densité, ...) aidant à réduire les volumes, les traitements biologiques (biocoulis, in-situ, phytoremédiation, bactérien,...) particulièrement adaptés pour la dégradation de la matière organique, les traitements chimiques (acides ou solvants organiques), thermiques (désorption, incinération, réduction, vitrification), ou encore, physiques (extraction électrique, flottation,...).

D'un autre côté au fil des ères des marnes argileuses rouges, jusqu'ici utilisées dans la fabrication de poterie locale telle que des assiettes et des tajines, se sont étalées en renferment des composants argileux. Elles sont exposées à la surface de la terre, aux actions météorologiques comme les pluies torrentielles, le gel, le froid, la chaleur et leurs alternances, l'humidité et la sécheresse, etc. Après des analyses physico-chimiques et minéralogiques effectuées sur des échantillons, ces marnes argileuses rouges ont révélées des possibilités concrètes de leur valorisation.

Objectifs de l'étude :

Le but de cette présente étude est en premier temps l'invention d'un procédé simple qui permet d'obtenir des pouzzolanes artificielles, à partir d'une matière première abondante et largement disponible, et au même temps se débarrasser des déchets de dragage qui commence à être de plus en plus encombrants. En deuxième temps l'incorporation de ces pouzzolanes à côté d'un clinker (Sour El-Ghozlane), pour déduire leurs effets sur les matériaux cimentaires (anhydre, mortier, béton).

Présentation de la thèse :

Cette thèse comporte deux parties, une partie bibliographique et l'autre est une partie pratique.

*En premier on a commencé avec une introduction générale consacrée à la description du problème et les objectifs de l'étude.

*La première partie est subdivisée en deux chapitres, le premier est une introduction au ciment, où on a exposé les différents types de ciment existant, leurs fabrications, leurs composantes, et bien d'autres propriétés. Le deuxième chapitre est une simple introduction à l'univers de l'argile, avec ces différents groupes et le mode d'altération, dans ce chapitre on a également donné un procédé simple pour la transformation d'une argile en une pouzzolane de synthèse.

*La deuxième partie est un chapitre qui relate sur les différents essais effectués, pour caractériser les nouveaux ciments de l'étude, analysés à l'usine de production « Sour El-Ghozlane ». Et enfin au sein des laboratoires du département de génie civil de l'université de M'sila, des essais destructifs ont été réalisés sur les bétons.

*A la fin, on a exposé l'aboutissement de nos travaux de recherches, en plus des recommandations et perspectives.

Chapitre 1 : Le ciment

Introduction :

Le ciment est le constituant de base des bétons et mortiers. Ce liant hydraulique permet en effet de coller entre eux les grains de sable et les granulats. Mis au point au début du XIXe siècle, le ciment est aujourd'hui le deuxième produit de consommation courante dans le monde après l'eau, et ne cessent d'augmenter.

En Algérie on utilise comme ajout le laitier de haut fourneau, pouzzolane naturelle ou tuf...etc. Et en faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciment avec des propriétés physico-mécaniques demandées.

I -Le ciment Portland :

I-1-Le ciment portland artificiel (CEM I) :

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans des conditions de durée et de températures suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principaux constituants sont : La silice, l'alumine, l'oxyde de fer et la chaux [1].

I-1-1- Composition chimique du clinker :

De fait, la chimie des ciments est essentiellement une chimie des oxydes, et c'est ce qui justifie les conventions d'écriture qui lui sont propres. (Tableau 1) [2]

Oxydes	Notation	Pourcentage	Marge d'erreur
Perte au feu	-	1,08	± 0,05
SiO ₂	S	21,1	± 0,1
Al ₂ O ₃	A	5,11	± 0,05
Fe ₂ O ₃	F	3,31	± 0,05
TiO ₂	-	0,21	± 0,01
MnO	-	0,04	± 0,01
CaO	C	65,5	± 0,2
MgO	M	1,31	± 0,03
SO ₃	Š	0,93	± 0,02
K ₂ O	K	1,02	± 0,02
Na ₂ O	N	0,21	± 0,02
P ₂ O ₅	-	0,04	± 0,01
SrO	-	0,08	± 0,01

Tableau 1- Exemple de composition chimique d'un clinker [2].

* La préparation du cru :

La plupart du temps, le cimentier doit mélanger deux ou plusieurs matières premières pour obtenir après cuisson un produit ayant les caractéristiques du clinker Portland naturel, c'est-à-dire le plus souvent du calcaire, de l'argile ou du schiste et d'autres matières pour obtenir du clinker, cette préparation se réalise en trois sortes. [3]

* *La voie humide* : ce procédé ancien est, d'une façon générale, remplacé par la voie sèche. Le remplacement est réalisé dans les pays industrialisés depuis vingt à trente ans sauf exception. Ce

procédé est en effet parfois encore utilisé, dans les pays industrialisés, pour incinérer des déchets industriels et agricoles.

* *Les voies semi-humide et semi-sèche* : ces technologies, utilisées il y a une trentaine d'années, présentaient l'avantage d'une consommation calorifique plus faible que la voie humide.

* *La voie sèche* : Les fours à préchauffeurs avec ou sans précalcinateurs sont les seuls procédés actuellement installés.

I-2-Le ciment portland composé (CEM II) :

Les ciments portland composés contiennent au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaires, et des ajouts avec 30%. On a, par convention [2]:

$$(\text{Clinker}) + (\text{autres constituants}) + (\text{constituants secondaires}) = 100.$$

Le ciment est le résultat du broyage d'un certain nombre de constituants qui peuvent se répartir en différentes familles : (tableau 2) [3]

*Le clinker Portland.

*Le régulateur de prise.

*Les additions.

-Les additions hydrauliques.

-Les additions pouzzolaniques.

-Les fillers inertes.

Suivant sa composition chimique il aura des propriétés différentes. Le clinker réagit avec l'eau pour développer son potentiel hydraulique. Ces réactions doivent être tempérées par le régulateur de prise, généralement un sulfate de calcium (gypse ou anhydrite). Des additions sont parfois utilisées pour des raisons économiques, pour leur potentiel hydraulique latent, ou pouzzolanique (naturelle ou artificielle).

Ciment Portland		Les additions			
Clinker	Régulateur de prise	Hydraulique	Pouzzolane	Inerte	Additifs
	Gypse Anhydrite	Laitier de haut fourneau Cendres volantes de lignite	Cendres volantes Argile calcinée Fumée de silice	Filler calcaire ou siliceux	Agent de broyage Adjuvants

Tableau 2 - Les constituants et les additions du ciment [3] .

La fabrication de ciment à teneur réduite en clinker, implique l'utilisation des composants minéraux peu coûteux permettant d'économiser le combustible énergétique lors de la fabrication, et de limiter ainsi l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère environnante.

Une augmentation de la production de ce type de ciment à faible teneur en clinker requiert cependant une étude systématique des différents composants entrant dans la composition des liants. Ainsi, la nature et la quantité des ajouts minéraux peuvent modifier les processus d'hydratation et les hydrates formés. De même, les propriétés mécaniques et la durabilité des composés obtenus.

I-2-1-Constituants principaux des ciments :

Associés au clinker, les autres constituants modifient les propriétés du ciment grâce à leurs caractéristiques chimiques et physiques. On appelle « constituant principal », un constituant entrant dans la composition du ciment dans une proportion excédant 5% en masse. La lettre entre parenthèse qui suit leur dénomination, est leur désignation abrégée [4].

I-2-1-1-Laitier granulé de haut fourneau (S) :

C'est un résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Il sort du trou de coulée à une température de l'ordre de 1500°C. Figé par refroidissement brusque il donne un produit granulé qui est ajouté au clinker en proportion variable pour être broyé finement avec lui. Il contient de la chaux (45 à 50%), de la silice (25 à 30%),



Figure 1 : Laitier granulé de haut fourneau vu au microscope [6].

de l'alumine (15 à 20%) et 10% environ de magnésie, oxyde divers et manganèse. Le laitier est un véritable ciment manifestant lui-même des propriétés hydrauliques, grandement activés d'ailleurs par la présence du clinker. Son hydratation, qui se traduit par le développement des résistances mécaniques est moins rapide que celle du Portland surtout dans sa période initiale. Elle dégage parallèlement moins de chaleur et accuse une sensibilité plus marquée aux variations de température (abaissement ou élévation). [5]

Le laitier retient un peu moins bien l'eau de gâchage que le portland et craint donc davantage la dessiccation. Mais chimiquement, il résiste normalement mieux tant à l'action destructrice des sulfates, qu'à la dissolution de la chaux par les eaux pures ou chargées de certains sels, ainsi que par celles contenant du gaz carbonique agressif.

I-2-1-2-Pouzzolanes :

Ce sont des produits naturels d'origine volcanique composés essentiellement de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique ; ils sont employés en cimenterie pour leurs propriétés « pouzzolaniques » c'est-à-dire une aptitude à fixer la chaux à une température ambiante et à former des composés ayant des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire pouvant faire prise et durcir par hydratation (désignation abrégée : Z). [5]



Figure 2 : Pouzzolane volcanique vu au microscope [6].

On obtient artificiellement des pouzzolanes à partir d'argile cuite par exemple. Les cendres des centrales thermiques (cendres volantes) constituent également des matériaux à caractères pouzzolaniques.

I-2-1-3-Cendres volantes (V ou W) :

Ce sont des produits pulvérulents de grande finesse résultant de la combustion en centrale thermique des combustibles minéraux solides (houille, lignite...); elles rentrent dans la composition de certains ciments en proportion variable (5 à 20%); on les ajoute au moment du broyage du clinker [5]. On distingue :

- Les cendres volantes siliceuses (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques.
- Les cendres volantes calciques (W) qui ont des propriétés hydrauliques et, parfois, pouzzolaniques [4].

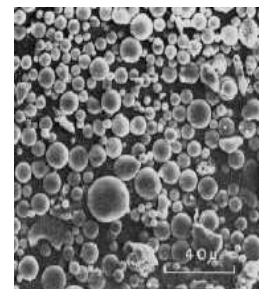


Figure 3 : Cendre volante vu au microscope [6].

I-2-1-4-Schistes calcinés (T) :

Ce sont des schistes (bitumineux) que l'on porte à une température d'environ 800°C, dans un four spécial. Finement broyés, ils présentent de fortes propriétés hydrauliques et aussi pouzzolaniques [4].

I-2-1-5-Calcaires (L) :

Pour pouvoir être considérés comme un constituant principal du ciment, les calcaires doivent être composés de 75% au moins de CaCO_3 [4]. Et dont la teneur en TOC (Total Organic Carbon) est limitée :

Si ce TOC est $< 0.20\%$ désignation abrégée : LL

Si ce TOC est $< 0.50\%$ désignation abrégée : L

Un béton confectionné avec un ciment contenant des proportions élevées en calcaire à haute teneur en TOC risque de ne pas accuser une haute résistance au gel-dégel [6].

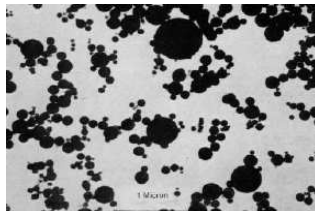
I-2-1-6-Fumées de silice (D) :

Sous-produit de la fabrication du silicium, du ferro-silicium et des silico-alliages. Les particules, amorphes, ont des dimensions de 0,01 à 1 mm.

Jusqu'en 1985, cette silice n'était pas valorisée. Ces "poussières" étaient d'abord rejetées dans l'atmosphère puis, pour protéger l'environnement, récupérées par filtration des fumées et placées en décharge.

Utilisée dans les bétons pour : augmenter la fluidité, la résistance en compression, et diminuer la porosité et la perméabilité; car la présence de fumée de silice accélère la réaction d'hydratation du ciment et favorise la création des sites de germination des cristaux de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dès les premières minutes qui suivent le début de la réaction [7].

Elles ne sont pas généralement utilisées en tant qu'ajout, mais plutôt avec des dosages appropriés aux besoins. C'est un produit très efficace pour la fabrication des bétons à très haute performance.



**Figure 4 : Fumée de silice
vu au microscope [6].**

I-3-Avantages fonctionnels, économiques et écologiques :

I-3-1-Bénéfices fonctionnels :

L'incorporation des particules fines améliore la maniabilité des bétons, réduit la demande en eau tels que : les cendres volantes ou le laitier qui diminuent le ressuage et la ségrégation, en diminuant le volume des vides (à l'exception des ajouts d'une grande surface spécifique comme la fumée de silice).

En plus les ajouts améliorent les propriétés mécaniques à condition d'optimiser la quantité d'ajout ; cette augmentation des résistances est due à l'affinage des pores et des grains. Et il ne faut pas oublier, que les ciments aux ajouts pouzzolaniques ont une meilleure résistance aux acides et aux sulfates, par rapport au ciment portland, ce qui a tendance à augmenter la durabilité du béton.

Enfin il y a une diminution de la chaleur d'hydratation dégagée du béton, ce qui diminue la fissuration d'origine thermique.

I-3-2-Bénéfices économiques :

La demande du marché pour le ciment a fortement augmentée au cours du 20^{ème} siècle, suivant le développement de l'industrie et les besoins de l'urbanisation croissante. Après la Seconde Guerre mondiale la consommation des pays industrialisés a été multipliée par un facteur de 6 à 8.

Or le ciment portland est le composant le plus coûteux dans la confection du béton, des produits de substitution mélangés au ciment portland en vue de le remplacer, purement pour des raisons économiques mais aussi pour améliorer certaines propriétés, et comme la production du ciment est un grand consommateur d'énergie, son remplacement par des ajouts minéraux réduit le prix du béton pour le coût du combustible.

I-3-3-Bénéfices écologiques et environnementaux :

A l'instar d'autres secteurs industriels, l'industrie cimentière fait l'objet d'une réglementation stricte en matière de protection de l'environnement, de santé, de sécurité et de qualité des produits.

La réduction des émissions de dioxyde de carbone CO₂ est l'un des plus grands défis lancés à l'industrie du ciment. La production d'une tonne de ciment provoque le rejet d'une tonne de CO₂. 55% de ces émissions proviennent du processus de décarbonatation et 45% de la combustion. L'industrie cimentière, a infléchi sa propre consommation d'énergie d'environ 30 % au cours des 20 dernières années, soit approximativement 11 millions de tonnes de charbon par an. Elle a également fortement investi dans diverses techniques d'élimination des poussières en réduisant de 90 % ses émissions.

La valorisation du laitier de haut fourneau, cendres volantes des centrales thermiques, pouzzolanes naturelles et du calcaire utilisés en tant que matières premières pour la production de clinker, a permis de protéger les ressources naturelles non renouvelables. Grâce à cette valorisation, l'industrie cimentière contribue à résoudre certains problèmes des déchets (sans compter les avantages qui en résultent au niveau des émissions de CO₂).

I-4- Autres types de ciment :

L'industrie de ciment est tenue par des exigences qu'elle doit respecter, certaines sont montrées dans les tableaux 3, 4, 5.

I-4-1- Ciment de Haut Fourneau CEM III :

Constitué d'un mélange de clinker et de laitier granulé de HF (teneur minimale 36 %).[6]

I-4-2- Ciment pouzzolaniques CEM IV :

Constitué d'un mélange de clinker, de pouzzolane et de cendre doit en plus satisfaire à l'essai de «pouzzolanité ». [6]

I-4-3- Ciment composé CEM V :

Constitué d'un mélange de clinker, de laitier granulé et d'autres constituants secondaires.[6]

Classe de résistance	Résistance à la compression MPa			Temps de début de prise (min)	Stabilité (mm)
	Résistance à cours terme		Résistance courante		
	02 jours	07 jours	28 jours		
32,5 N	--	= 16,0	>=32,5	<=52,5	>=75
32,5 R	10,0	--			
42,5 N	10,1	--	>=42,5	<=62,5	>=65
42,5 R	20,0	--			
52,5 N	20,1	--	>=52,5	--	>=45
52,5 R	30,0	--			

Tableau 3- Exigences mécaniques et physiques [2].

Propriétés	Référence de l'essai	Types	Classe de résistance	Exigence
Perte au feu	EN 196-2	CEM I	Toutes classes	<=5,0%
		CEM II		
Résidu insoluble	EN 196-2	CEM I	Toutes classes	<=5,0%
		CEM III		
Sulfate (SO ₃)	EN 196-2	CEM I	32,5 N	<=3,5%
			32,5 R	
		CEM II	42,5 N	<=4,0%
		CEM IV	42,5 R	
		CEM V	52,5 N	
		CEM III	52,5 R	
	Toutes classes			
Chlorure	EN 196-21	Touts types	Toutes classes	<=0,10%
Pouzzolanité	EN 196-5	CEM IV	Toutes classes	Satisfait l'essai

Tableau 4 - Exigences chimiques [2].

Notion	Clinker (K)	Autres constituants	Constituants secondaires
Ciment Portland			
CPA-CEM I	95-100	-	0-5
Ciment Portland Composé			
CPJ-CEM II/A	80-94	6-20*	-
CPJ-CEM II/B	65-79	21-35*	-
* Les constituants autres que le clinker sont : - (S), (Z), (V), (W), (T), (L) ; - (D), en proportion limitée à 10% ; - (F), en proportion limitée à 5% (constituants secondaire compté avec les autres constituants).			
Ciment de haut fourneau			
CPF-CEM III/A	35-64	36-65*	0-5
CPF-CEM III/B	20-34	66-80*	0-5
CLK-CEM III/C	5-19	81-95*	0-5
* Laitier granulé de haut fourneau (S) uniquement			
Ciment Pouzzolanique			
CPZ-CEM IV/A	65-90	10-35*	0-5
CPZ-CEM IV/B	4-64	36-55*	0-5
* Les constituants autres que le clinker sont : -Les pouzzolanes naturelles (Z) et les cendres volantes siliceuses (V) ; - Les fumées de silice (D), en proportion limité à 10%			
Ciment au Laitier et aux Cendres			
CLC-CEM V/A	40-94	18-30*	0-5
CLC-CEM V/B	20-39	31-50*	0-5
Pouzzolanes naturelles (Z) ou cendres volantes siliceuses (V)			

Tableau 5- Les cinq types des ciments courants et leur composition (NF P 15-301) [2].

Le C₃A, en l'absence d'ions sulfate (équation 3.3), s'hydraterait et formerait des aluminates hydratés appelés hydrogarnet. Cette réaction étant très rapide, on assisterait à une prise presque instantanée. En présence de sulfate (sulfate de calcium) et d'eau, le C₃A s'hydrate lentement (équation 3.4) et forme de l'ettringite (C₆AŠ₃H₃₂). Lorsqu'il y a épuisement du sulfate de calcium, le C₃A réagit avec l'ettringite (équation 3.5) pour former le monosulfoaluminate de calcium hydraté.

Enfin, le C₄AF s'hydrate selon la même séquence que le C₃A, mais les réactions sont beaucoup plus lentes. L'oxyde de fer semble jouer le même rôle que l'oxyde d'aluminium durant l'hydratation.

Pour un matériau ordinaire à base de ciment CEM I, l'épuisement de l'ettringite est rare. Ca pourrait tout de même être le cas si la teneur en gypse est faible et/ou si les ciments sont très riches en C₃A.

Il est indiqué pour, que les réactions d'hydratation se poursuivent, une certaine quantité d'eau doit être absorbée par les hydrates, sans que celle-ci soit chimiquement liée. Cette eau absorbée sert majoritairement à remplir la porosité des CSH elle est absolument indispensable à leur formation [10].

Constituants	M _i (g.mol ⁻¹)	ρ _i (g.cm ⁻³)	Constituants	M _i (g.mol ⁻¹)	ρ _i (g.cm ⁻³)
C ₃ S	236,33	3,13	Ca(OH) ₂	74,08	2,23
C ₂ S	176,25	3,28	C ₃ S ₂ H ₃	342,40	2,63
C ₃ A	270,20	3,03	C ₆ AŠ ₃ H ₃₂	1338,69	1,78
C ₄ AF	485,97	3,73	C ₄ AŠH ₁₂	650,36	2,02
CŠH ₂	200,26	2,32	C ₃ AH ₆	378,19	2,52

Tableau 6- Masses molaires, masses volumiques des réactifs et des produits des réactions d'hydratation (à 20° C) [3].

I-5-1-Théorie de durcissement et de prise :

La propriété essentielle des ciments est de donner, avec l'eau, une pâte qui fait prise et durcit bien à l'air que sous l'eau. Les premières réactions ont lieu en surface et il en résulte une augmentation de la viscosité de la pâte, c'est la prise. La réaction gagne ensuite tous les grains, ce qui accroît la cohésion [11]. L'ettringite devient alors source de sulfate pour former avec l'aluminate excédentaire le monosulfoaluminate (équation 3.5); c'est le début de la période de durcissement [9].

I-5-1-1-La théorie cristalloïdale :

En 1882 Le Chatelier avança la théorie de durcissement par cristallisation, d'après laquelle les constituants minéraux anhydres du ciment, dont la solubilité dans l'eau est plus forte que celle des produits de leur hydratation, constituent des solutions sursaturées par rapport aux composés hydratés formés. Ces derniers se précipitent en forme de cristaux à partir de la solution sursaturée et à mesure que le processus se poursuit, engendrant la formation d'un agrégat cristallin dont la solidité est suffisamment grande [8].

I-5-1-2-La théorie colloïdale :

V. Michaelis, qui proposa en 1893 une théorie colloïdale, ne niait pas le fait de formation des cristaux lors du durcissement du ciment portland ; mais il considérait important de souligner non pas la résistance des ciments, mais leur « hydraulicité ». Le rôle essentiel dans l'acquisition

des qualités de résistance, d'étanchéité à l'eau ainsi que d'autres propriétés du ciment durci est attribués aux hydrogels des silicates, des aluminates et des ferrites de calcium se formant au cours du durcissement. Selon Michaelis les hydrosilicates ne cristallisent pas lors du gâchage du ciment et le durcissement se réduit à la formation des gels par gonflement des grains du ciment en présence de l'eau, suivit de leur consolidation et de la germination des cristaux au sein de ces gels [8].

I-5-1-3-La théorie mixte :

En 1923 A. Baikov émit une théorie de durcissement des liants qui, dans une large mesure, a synthétisé les conceptions de Le Chatelier et de V. Michaelis. A. Baikov expliquait le durcissement par l'ensemble de la cristallisation et de la formation des gels. Il a énoncé le principe que tout liant hydraulique passe obligatoirement par une phase colloïdale et ceci même si en fin de compte il aboutit à une formation d'un véritable agrégat cristallin. Dans cette théorie le durcissement du ciment portland passe par trois étapes :

*Le liant se dissout dans l'eau jusqu'à formation d'une solution saturée.

*Etape colloïdale ou de prise : se caractérise par l'addition de l'eau à la phase solide du liant et la formation de composés hydratés à haute dispersion colloïdale, sans dissolution intermédiaire du matériau de départ et simultanément a lieu la prise de la masse.

*Etape de cristallisation et de durcissement : qui se manifeste lorsque les micelles de gel recristallisent et forment un agrégat cristallin ce qui s'accompagne du durcissement du système et de l'accroissement de sa résistance [8].

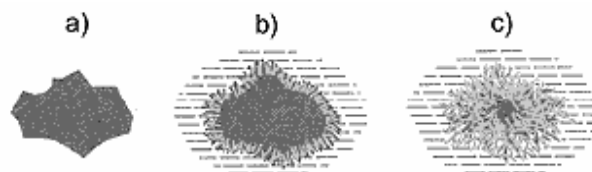


Figure 5 : Hydratation du grain de ciment [1].

a) Grain de ciment avant l'adjonction d'eau

b) Grain de ciment peu de temps après l'adjonction d'eau

c) La plus grande partie du grain de ciment s'est transformé en gel de ciment

I-6-Le broyage [12]:

Le broyage du ciment portland s'obtient par le broyage d'une roche artificielle, à laquelle on mélange environ 5 % de sulfate de calcium destiné à régulariser la prise. Nous pouvons aussi ajouter des matériaux secondaires (pierre calcaire, matériaux pouzzolaniques, ...).

Afin de réduire en poudre suffisamment fine les différents constituants des ciments, on utilise presque toujours des broyeurs à boulets. Ils ont un rendement faible car une grande partie de l'énergie fournie est transformée en chaleur, le reste sert à la fragmentation des matériaux. Les grains sont traités collectivement à l'intérieur des broyeurs par les boulets qui opèrent par chocs et attrition.

Les broyeurs fonctionnent soit en circuit ouvert, soit en circuit fermé (cas des installations modernes):

I-6-1-Les paramètres opérationnels affectant le procédé de broyage :

Un ou plusieurs de ces facteurs peuvent sérieusement affecter la production à la fois qualitativement et quantitativement.

-Les taille des particules : permettant au broyeur d'avoir un rendement optimal. Dans le cas des broyeurs à boulets, il est recommandé d'utiliser des particules dont 80% ont moins de 25 mm.

-La dimension et le nombre des charges broyantes: c'est l'un des principaux facteurs affectant l'efficacité du procédé de broyage. Si les boulets sont trop gros, le nombre de rupture des particules sera réduit. D'un autre côté, si les boulets sont trop petits, il y a perte d'efficacité avec beaucoup de contacts et une force insuffisante pour casser les particules.

-Le système de broyage: en général, un circuit ouvert demande plus d'énergie qu'un circuit fermé. Une meilleure distribution des particules et une meilleure efficacité sont obtenues en circuit fermé.

-La vitesse de rotation critique: les boulets sont conçus pour fonctionner à une vitesse de rotation critique. La vitesse critique est la vitesse minimale avec laquelle le broyage est effectué afin que les boulets tombent par gravité sans glissement. La vitesse réelle du broyeur correspond de 65 à 80 % de la vitesse critique et celle-ci dépend du diamètre intérieur du broyeur (D) suivant la formule:

$$\text{Vitesse critique} = 42,3 D^{-1/2} .$$

-La température de broyage: une étude sur le broyage du clinker entre 30 et 500°C, a été faite et la principale conclusion est qu'une gamme de température de broyage entre 200 et 400°C, doit être évitée. [12]

I-7-Le retrait :

Dès sa mise en oeuvre, le béton est sujet à des fluctuations volumiques causées par le développement microstructural de la matrice cimentaire et le processus exothermique d'hydratation du ciment. Sous certaines conditions structurales, environnementales et climatiques, ces déformations peuvent rapidement provoquer la fissuration prématurée du matériau et compromettre l'esthétique, les performances et la durabilité des ouvrages en service.

L'étude des propriétés thermo-physiques des pâtes de ciment durcissantes a montré, que d'une manière générale, leurs variations étaient relativement faibles au très jeune âge et en cours de prise [13].

En effet, le comportement d'un matériau cimentaire est influencé par la variation de son humidité interne. Le retrait total des mortiers ou des bétons est la somme de plusieurs retrait : le retrait endogène (somme de la contraction Le Châtelier et du retrait d'autodessiccation), le retrait thermique et le retrait de dessiccation. Un retrait supplémentaire, appelé retrait de carbonatation, est à prendre en considération lorsque les éprouvettes sont conservées pour de très longues périodes dans un environnement contenant un fort taux de CO₂. Le retrait de dessiccation est provoqué par un départ de l'eau libre, lorsqu'il est mis au contact d'un milieu dont l'humidité relative est inférieure à celle du matériau. Parallèlement, les propriétés élastiques du matériau s'endommagent : le module d'élasticité diminue avec la perte en masse respectivement de 10 et 25% pour le mortier et le béton. [14].

Chapitre 2 : L'argile et la calcination

Du latin « argilla », l'argile se définit comme une terre grasse et molle contenant un ensemble de particules fines ($<2\mu\text{m}$), constituées essentiellement de minéraux à structure en feuillets et présentant une plasticité à l'état humide.

Curieusement, les argiles sont les roches qui ont résistées le plus longtemps à l'analyse et à la compréhension des hommes. Ce ne sont que les outils modernes de la minéralogie qui ont permis de pénétrer les secrets de ces matériaux utilisés empiriquement depuis des millénaires. Les roches argileuses sont donc formées de mélanges de minéraux argileux auxquels viennent s'associer des minéraux allogènes : quartz, feldspaths, micas, minéraux lourds et parfois des minéraux authigènes : anatase, sulfates, etc.

II-1-Les minéraux argileux :

Pour en connaître la nature, la structure et la classification, il a fallu attendre le 20^{ème} siècle. Ce furent la diffraction des rayons X, l'analyse thermique différentielle, la microscopie et la microdiffraction électroniques, la spectroscopie infrarouge, qui ont contribuées à cet essor. A cela s'ajoutent les diverses méthodes d'analyses chimiques qui peuvent s'effectuer sur des minéraux purs.

Les minéraux argileux sont en général en forme de feuilles, d'où leur nom de phyllites. Ils appartiennent, comme les micas, au groupe des phyllosilicates. Chaque cristal ou phyllite, dont l'épaisseur se mesure en micromètres, est composé de quelques centaines de feuillets empilés, qui se mesurent en nanomètres. Chaque feuillet est composé de deux, trois ou quatre couches planes associées. De ses variations viennent les différentes espèces de minéraux argileux, parmi elles :

II-1-1-Les illites :

Ce minéral est le plus répandu des minéraux argileux dans les sédiments et les sols. Il est construit sur le modèle du mica blanc, mais avec une structure plus désordonnée et moins de potassium dans les espaces interfoliaires. Il est très fréquent dans une foule de roches détritiques comme matrice ou comme ciment. [15]

II-1-2-Les montmorillonites :

Les montmorillonites peuvent être détritiques, par héritage des sols ou des sédiments plus anciens qui les contiennent. Elles peuvent être néoformées en milieu alcalin à partir des autres silicates ou à partir des verres volcaniques. Elles ont une foule d'applications économiques, dans les industries chimiques, les boues de forage, etc. [15]

II-1-3-Le kaolin :

D'origine chinoise, « Kaoling », La kaolinite se forme comme produit résiduel météorologique ou comme minerai sédimentaire, dans les sols. Elle est formée dans les conditions de pression et de température de la surface de la terre (c.-à-d., 25–30°C et de pression atmosphérique).

Associe dans son feuillet, une couche de tétraèdres à cœur de silicium et une couche d'octaèdres à cœur d'aluminium. La distance de la surface d'un feuillet à l'autre est de 0,74 nm. Elle appartient au système triclinique [16].

II-2-Les roches argileuses : [17]

Les argiles ou roches argileuses sont un mélange de minéraux argileux avec les divers autres minéraux présents dans la nature. On peut évoquer les argiles sableuses, les argiles calcaires ou marnes. Pour qu'une roche mérite le nom d'argile, il faut que la proportion de minéraux argileux soit assez grande pour communiquer au matériau ses propriétés communes principales : finesse, fragilité, plasticité, durcissement à la cuisson, etc.

La classification des roches argileuses est restée peu codifiée. Elle est souple et libérale. La diversité du vocabulaire permet de cerner la réalité de très près. On distingue les variétés selon la texture, selon les minéraux associés les plus évident (tableau 7 [17]), selon les faciès, selon les matières organiques ou organismes présents, etc.

Principales familles		Espèces minérales				
		Composantes dominantes				
		<i>Si et Al</i>	<i>Si, Al, Fe et Mg</i>	<i>Si, Al et Mg</i>	<i>Si et Mg</i>	<i>Si et Fe</i>
Minéraux à 2 couches		Kaolinite Halloysite	Berthiérine (Chomasite)	Amésite	Serpentine (Antigorite) (Chrysolite)	Greenalite Cronstedtite
Minéraux à 3 couches	Illite et vermiculite	Illite vermiculite	Illite vermiculite	vermiculite		Glauconite (Céladonite)
	Smectite	Montmorillonite	Beidellite	Saponite	Stévensite hectorite	Nontronite
	Chlorite	Chlorite	Chlorite (Clinochlore)	Chlorite	Chlorite (Pennine)	Chlorite (Bavalite) (Thuringite)
	Pyrophyllite et talc	Pyrophyllite	Minnesotaïte		Talc	
Minéraux en lattes				Attapulгите	Sépiolite	

Tableau 7- Classification sommaire des minéraux argileux [17].

II-2-1-Les argiles de la zone d'altération météorique :

Les roches de toutes natures sont exposées à la surface de la terre, aux actions météorologiques comme la pluie, la neige, le froid, la chaleur et leurs alternances, l'humidité et la sécheresse, etc. Dans ses conditions les roches s'altèrent et sont très vite colonisées par les organismes vivants (végétations, occupation animale et bactérienne).

II-2-2-Les argiles de la zone de sédimentation :

De la surface des continents, nous passons au fond des bassins sédimentaires : océans, mers intérieures et lacs. Là se déposent les sédiments : sables, argiles, calcaires, ou leur mélange, auxquels s'ajoutent les débris ou reliques des organismes vivants. S'y mêlent, en maints endroits, les cendres et les tufs volcaniques.

Du côté des sédiments argileux vont à nouveau rivaliser les argiles venues du continent et c'est l'héritage, les argiles héritées mais modifiées par les transformations, et les argiles néoformées de toutes pièces.

II-3 - Qu'est ce qu'une pouzzolane de synthèse :

Les romains augmentaient la résistance de leur chaux en y ajoutant des fines prélevées sur les pentes du Vésuve (Vesuvius) non loin de Pouzzoles (Pozzuoli). De la découle par extension le terme de « Pouzzolane » donné à toute fine qui réagit avec l'hydroxyde de calcium pour formé un composé stable.

Les différentes définitions rencontrées présentent les produits à caractère pouzzolanique comme :

- Des composés minéraux pauvres en chaux, et une fois en présence de chaux et d'eau acquièrent des propriétés liantes.
- Les matériaux pouzzolaniques, sont des matériaux siliceux, n'ayant pas des propriétés liantes eux-mêmes, mais contenant un certain nombre de composants qui, à température ordinaire, peuvent se combiner avec la chaux en présence d'eau pour former des produits ayant une solubilité très faible et possédant des propriétés liantes.
- La réglementation ASTM 618-71 sur le ciment, indique qu'une pouzzolane est un matériau siliceux ou silico-alumineux, ne possédant pas ou peu de propriétés liantes en lui-même, mais qui, lorsqu'il est finement broyé et en présence d'eau, peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium à température ordinaire pour former un ciment.
- Les matériaux pouzzolaniques sont des matériaux siliceux, alumineux ou ferrugineux, n'ayant aucune propriété liante en eux-mêmes, mais qui, sous certains états de cristallinité et de structure, peuvent réagir, en présence de chaux et d'eau à température et pression normales, pour donner un ciment.

La réaction peut s'écrire de façon très schématique comme suit :



Ces dernières définitions se limitent aux cendres volcaniques qui se forment naturellement ainsi aux argiles calcinées qui peuvent réagir avec la chaux, en présence d'eau et à température ambiante.[18]

Récemment, ces termes ont été prolongés pour couvrir tous les matériaux silico-alumineux, qui en présence d'eau réagissent avec l'hydroxyde de calcium pour former des composés « hydratés » possédant les propriétés des ciments. [19]

II-4-La Calcination:

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence.

Pendant le chauffage, l'eau est perdue d'après les courbes DTA/TG/DTG et un mélange de silice et d'alumine amorphes sera formé.

Pour valoriser les argiles, comme substituant partiel du clinker, le traitement thermique appliqué doit assurer la déshydroxylation tout en :

*Éliminant toutes les matières organiques incompatibles avec le ciment.

*Évitant la décarbonatation de la calcite néfaste pour la maniabilité des mortiers et bétons.

La calcination entre 550 et 800 °C des argiles permet le départ de l'eau de constitution (la déshydroxylation). La structure amorphe rend l'argile plus réactive que celle du départ à la chaux. Ce qui explique la forte diminution de la concentration en CaO de la solution. En présence de l'eau, la chaux réagit avec l'argile pour former des silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté qui dépendent de la minéralogie des pouzzolanes et la solubilité des phases cristallines et non- cristallines.[20]

II-4-1-La calcination flash :[21]

La calcination flash, est une calcination très rapide d'un solide, généralement sous forme fine en suspension dans un gaz. La représentation de l'évolution de la température en fonction du temps permet d'obtenir l'historique thermique des particules.

Bien que la plupart des transformations chimiques et physiques aient une cinétique rapide à haute température, le temps très court de résidence dans le four mène à des transformations qui peuvent partiellement ne pas être terminées. Les changements sont cinétiquement bloqués et les produits incomplètement déshydroxylés si le temps d'exposition est trop court. Les propriétés des solides préparés sous ces procédés de chauffage flash, sont différentes de celles des matériaux traités dans des conditions de calcination où l'équilibre chimique et physique a pu être atteint.

II-4-2- La calcination lente :

Dans la calcination lente industrielle, la déshydroxylation est complète après avoir mené lentement l'échantillon à une température suffisamment haute (entre 600°C et 1100°C) pendant un degré suffisamment long (une voir plusieurs heures), comme le montre la figure 6. [21]

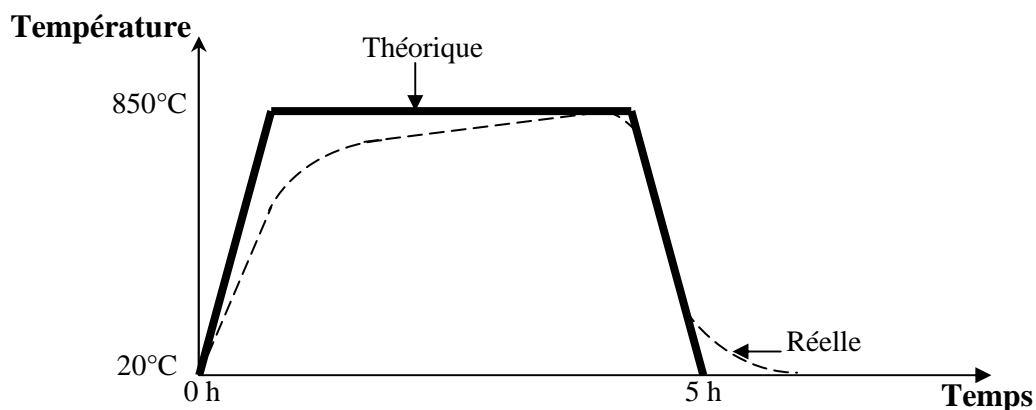


Figure 6 : Température du four en fonction du temps [21].

III-1- Pourquoi la vase ?

Le développement économique et social demeure tributaire pour une grande part d'une utilisation rationnelle de deux principales ressources, l'eau dont la mobilisation insuffisante actuellement demande à être d'avantage maîtriser et étendue, et le sol dont la mise en valeur est plus que jamais impérative. Or, ces deux potentialités sont menacées par l'érosion hydrique qui en a fait des facteurs limitants.

L'Algérie consacre un effort considérable pour alimenter en eau potable sa population et vivifier par l'irrigation certaines parties de son territoire. Cela pour pallier l'insuffisance et l'irrégularité de la pluviométrie.

L'érosion est un processus naturel d'ablation des sols, de transport et enfin de dépôt des particules de terre, on parlera essentiellement d'érosion hydrique.

L'érosion hydrique est un phénomène complexe très répandu en zone méditerranéenne, touchant particulièrement les pays du Maghreb dont il menace gravement les potentialités en eau et en sol. Les conditions physiques, géomorphologiques, hydro-climatiques et socio-économiques des pays du Maghreb sont particulièrement favorables au déclenchement et à l'accélération de ce phénomène.

Selon la direction générale des forêts, l'ampleur du phénomène en Algérie est considérable et a pour causes principales, des facteurs physiques et socio-économiques:

III-1-1- Facteurs Physiques :

*Les pluies torrentielles sous forme d'averses orageuses de fortes intensités (supérieure à 100 mm/heure) qui se produisent souvent en automne, période où le sol est pratiquement dénudé donc facilement érodable.

*La nature lithologique du substrat constitué en majorité de roches tendres (argiles, schistes, ...) étant donné la jeunesse du relief.

*La prédominance de fortes pentes (31% du territoire du Nord de l'Algérie a une pente de plus de 12,5%) qui augmente la vitesse de ruissellement et donc le ravinement des sols.

III-1-2- Facteurs socio-économiques :

*La généralisation du système de production (céréale - élevage extensif) de caractère minier sur pente forte.

*Les défrichements et incendies répétés des forêts et maquis.

*Les techniques culturales utilisées (labours dans le sens de la pente, systèmes culturaux inadaptés, etc.) ainsi que le morcellement excessif des exploitations contribuent à l'aggravation des phénomènes d'érosion.

Les incidences financières et écologiques sont de plus en plus décriées par les experts internationaux en hydraulique. Le même constat s'applique évidemment aux barrages nationaux.

Ces derniers ont été construits, il est vrai, pour les nombreux avantages qu'ils procurent, mais il n'en demeure pas moins qu'ils présentent de nombreux inconvénients, qui d'ailleurs sont le plus souvent occultés ou passés sous silence volontairement.

L'un des ennemis pervers de ses barrages est l'envasement ou ce que les experts appellent l'« ennemi silencieux » et qui cause annuellement, selon la banque mondiale, un préjudice avoisinant le 1% du coût global de l'investissement. En effet, toutes les études ont montrées que ce phénomène produit un dépôt de vase de l'ordre de 4,5 milliards de mètres cubes, ce qui réduit les capacités de stockage des barrages d'environ 11%. Cependant, ce taux est encore plus important concernant les barrages algériens.

Nous remarquons que le volume moyen par barrage exploité est passé de 23 millions de m³ en 1962 à 20 millions de m³ en 1994. Selon les estimations de l'agence nationale des barrages (ANB), quatorze barrages accusent un taux d'envasement ahurissant, qui a complètement mis hors d'usage leurs équipements hydromécaniques. Il s'agirait des barrages de Fergoug (Mascara), envasé à hauteur de 78%, Meurad (Tipaza) à 72%, Beni Amrane (Boumerdès) à 65%, Hamiz à 26%, Ksob (M'sila) à 47%, Foum El Gueiss à 84%, Zardezas à 18%, Merdja Sidi Abed (Relizane) à 13%, Oued Fodha (Chlef) à 45%, Ghrib (Aïn Defla) 48%, Bouhanifia (Mascara) à 26%, Boughezoul (Médéa) à 35% et Beni Bahdel (Tlemcen) à 12%. Cet état des lieux ne prend pas en ligne de compte un nombre assez important de petits barrages complètement abandonnés. On citera à titre d'exemple le barrage d'Arzew.

En Algérie les questions liées aux dragages se rapportent principalement à la récupération des volumes de stockage perdus d'année en année suite à l'érosion des bassins versants. La construction de nouvelles retenues est le plus souvent confrontée à la non existence de nouveaux sites, en plus des coûts qu'elle représente. Il est donc vital de préserver les moyens existants tout en recherchant de nouvelles ressources pour le développement des régions.

Ces opérations de dévasement sont naturellement coûteuses, mais néanmoins indispensables. Les matières solides issues du dragage, sont juste larguées en aval ou stoker dans des énormes digues, ont causées de nombreux dégâts à l'environnement. Leur valorisation contribue certainement à l'amortissement des coûts liés au dévasement ainsi qu'à préserver un environnement qui dans un passé proche, a été le reflet d'une prospérité remarquable.

Les vases sont caractérisées par la présence de matières organiques, animales ou végétales. Elles constituent ce liant noirâtre à odeur souvent prononcée, si spécifique de ce produit. La teneur en matière organique est très variable. Elle va de 4 à 5% pour les vases sableuses des estuaires ou de littoraux jusqu'à près de 90% pour certain vases lacustres ; elle est au moyenne de l'ordre de 10%.

Après destruction à chaud, des matières organiques de la vase, il reste un sédiment détritique argilo-sableux, où l'argile et le sable se trouvent en proportion variable. Il y a des vases essentiellement sableuses ou presque uniquement argileuses [22].

Jusqu'à lors, la vase est réutilisée comme brique de tuile. Des échantillons secs portés à 105°C pendant 24 heures peuvent être employés directement dans le processus de fabrication, où une pré-incinération n'est pas nécessaire. Les récents travaux mettent en évidence l'agglomération de la vase avec le cambouis des installations de traitement des effluents [23]. Une autre approche consiste à engendrer un traitement électrocinétique afin d'améliorer les caractéristiques mécaniques des vases par la consolidation. [24]

III-2-M'sila terre d'argile gréseuse :

« L'Algérie du nord, peuplée, vivante, ouverte sur la méditerranée, est pour le géologue une zone instable, mobile. De l'Atlas saharien à la mer ... fait partie du vaste système alpin qui ... n'a pas encore terminé son évolution ... Le sud c'est d'abord le désert vide, dur, mort, monotone à l'infini qui commence au pied de l'Atlas saharien. Pour le géologue c'est aussi un autre monde : celui de la vieille Afrique, stable, consolidée depuis des centaines de millions d'années et dans laquelle l'Algérie vient profondément s'enclaver... Le Sahara algérien se comporte comme une grande dalle ... elle voit s'accumuler alternativement des sables et argiles continentaux ... les sédiments qui vont se disposer ensuite pendant le tertiaire et le quaternaire seront donc purement continentaux » [J. Fabre : Introduction a la géologie du Sahara Algérien].

Avec une superficie assez importante (18175Km²) , allons de 3 - 5° Est et de 34 - 36° Nord, la vingt-huitième wilaya est une sorte de cuvette, avec une issue au sud vers Biskra. La mer demeure jusqu'à la fin de l'Eocène inférieur, ensuite elle se retire par étapes, plus précoce au Tanérouft, plus tardif au Sahara septentrional. C'est l'installation de l'Oligocène cinquième période de l'ère cénozoïque (troisième période du tertiaire), de 40 à 25 millions d'années avant notre ère et la formation du continent de Gondwana, ce régime continentale qui dure encore aujourd'hui [25].

Au nord de M'sila une zone pluvieuse, avec une moyenne de 18°C annuelle et un vent froid et des croûtes de calcaire et dolomies c'est l'Atlas Tellien, au sud c'est généralement du sable, une zone qui marque le début du Sahara, c'est l'Atlas Saharien, d'où le nom « La portière de Sahara ».

III-3-Quel est l'intérêt des matériaux locaux ?

La fabrication de matériaux de construction est une nécessité pour l'économie, principalement au profit du développement des infrastructures immobilières. L'utilisation de matériaux de construction importés (équipements et produits de transformation) engendre des coûts prohibitifs au détriment de la croissance économique nationale.

Il est donc nécessaire que des mesures incitatives à la promotion des matériaux locaux de construction soient encouragées pour favoriser la valorisation des ressources locales et le développement de l'esprit d'initiative.

Ainsi, ces matériaux ont l'avantage d'être compétitifs, disponibles à des prix défiant toute concurrence et en parfaite harmonie avec notre milieu ainsi que nos conditions de vie. En plus, ils ont l'avantage de contribuer à l'économie créant des emplois et des sources de revenu aux citoyens. Mais plus encore une diminution des coûts de transport, l'indépendance par rapport aux fluctuations de prix ou à d'éventuels problèmes politiques, la création d'une industrie locale donc d'emplois.

Il existe également d'autres raisons, plus philosophiques : indépendance et fierté nationale, développement endogène, promotion d'une architecture vernaculaire, logique de construction, intégration aux sites.

Par son site les dépôts minéraux en rendus la wilaya de M'sila riche en matière de toutes sortes. Ces dernières années M'sila se dirige vers une autosuffisance en matériaux de construction, l'usine de ciment « Algerian Ciment Company (ACC) » qui se trouve à la sortie ouest , alimente non seulement la wilaya de ses besoins en cette matière mais tout le pays, la carrière de roche de « Cosider » à la sortie nord, et aussi celles des particuliers jouent un rôle prépondérant à l'alimentation du marché local et environ d'agrégats de tous diamètres sans oublier bien sur les carrières de sable vers Bou-Sâada qui viennent compléter le squelette granulaire, ajouter à cela une usine pour les barres de fer dans les proches délais.

IV- Transformation des argiles pendant un traitement thermique :

En 1887, Le Chatelier, attira l'attention sur l'intérêt de l'analyse thermique lors de ses recherches sur les argiles, et montrera que l'on pouvait baser une classification de ces minéraux sur les anomalies thermiques qu'ils présentaient en cours d'échauffement. C'est ainsi que dans le cas du Kaolin, Le Chatelier mit le premier en évidence l'existence d'un phénomène exothermique à une température voisine de 1000°C.

L'analyse thermique et la calorimétrie regroupent différentes techniques qui sont généralement :

- L'analyse thermique différentielle (ATD) ; différence de la température.
- La calorimétrie à balayage différentielle (DSC) ; différence de la chaleur.
- La thermogravimétrie (ATG) ; différence de la masse.
- La dilatométrie, en particulier l'analyse thermomécanique (TMA) ; différence de la dimension.

Et en peut citer encore:

- *Analyse Mécanique Dynamique (DMA) ; rigidité et atténuation mécaniques.
- *Courant Thermiquement Stimulé ; alignement et relaxation de dipôle.
- *Analyse Diélectrique (DEA) ; constante diélectrique et facteur de perte.
- *Analyse Évoluée De Gaz (EGA) ; produits gazeux de décomposition.
- *Analyse Thermo-optique (TOA) ; propriétés optiques.

Et Parfois en peut même trouver des analyses couplées ATG/DSC ou ATG/EGA.

Actuellement ces procédés sont très employer, car ils sont applicables à des argiles mal cristallisées qui sont difficilement étudiables aux rayons X. [26]

L'analyse thermique différentielle a été imaginée par Roberts-Austen en 1899. Le principe est le suivant : deux creusets sont positionnés dans un four de façon à être soumis au même programme de température. L'un contient l'échantillon à tester, et l'autre un matériau de référence n'ayant aucune transition sur la plage d'essai (figure 7). L'appareil mesure à chaque instant du programme la différence (ΔT). [27]

L'analyse thermique différentielle est basée sur les réactions thermiques qui se produisent lorsqu'un minéral est chauffé. Les variations de températures sont reportées en fonction du temps et de la température. La courbe enregistre l'absorption de chaleur (réactions endothermiques généralement), et aussi les recristallisations et les recombinaisons ou encore le dégagement de chaleur (réactions exothermiques). (Exemple Figure 8) [28]

Le dispositif d'appareillage peut être extrêmement varié, mais le principe est toujours identique ; il s'agit d'élever la température du produit à analyser et d'une substance témoin. Le chauffage doit être réalisé rapidement, c'est-à-dire que la température doit s'élever de 400 à 600°C par heure aussi régulièrement que possible. Les analyses sont réalisées sous balayage d'un gaz inerte (l'argon) pour éviter toute réaction du matériau à étudier avec l'atmosphère du four.

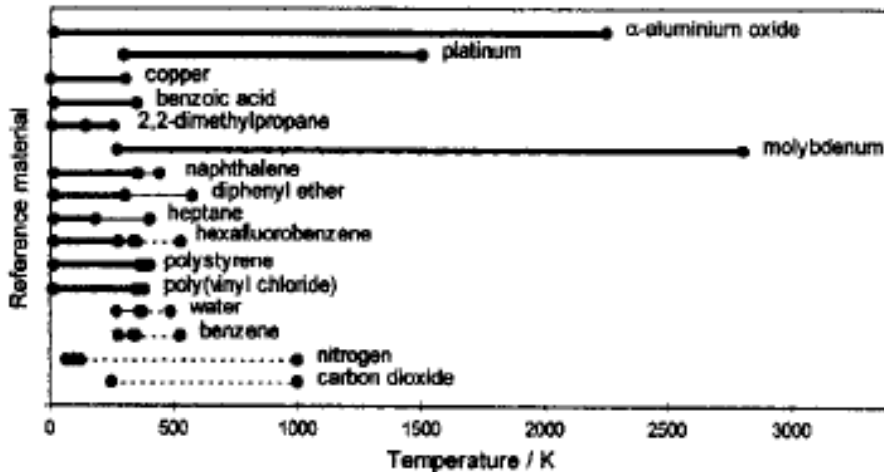


Figure 7 : Matériaux de référence recommandés pour la mesure de la chaleur spécifique [28].

L'oxyde d'aluminium ou saphir et le matériau de référence le plus connu pour la détermination de la chaleur spécifique, il est certifié sur la gamme de température 10 à 2250 K. Parmi d'autres métaux, des travaux ont été réalisés sur le platine (298,15 à 1500 K), le cuivre (1 à 300 K), le molybdène (jusqu'à 2800 K), et même le tungstène.

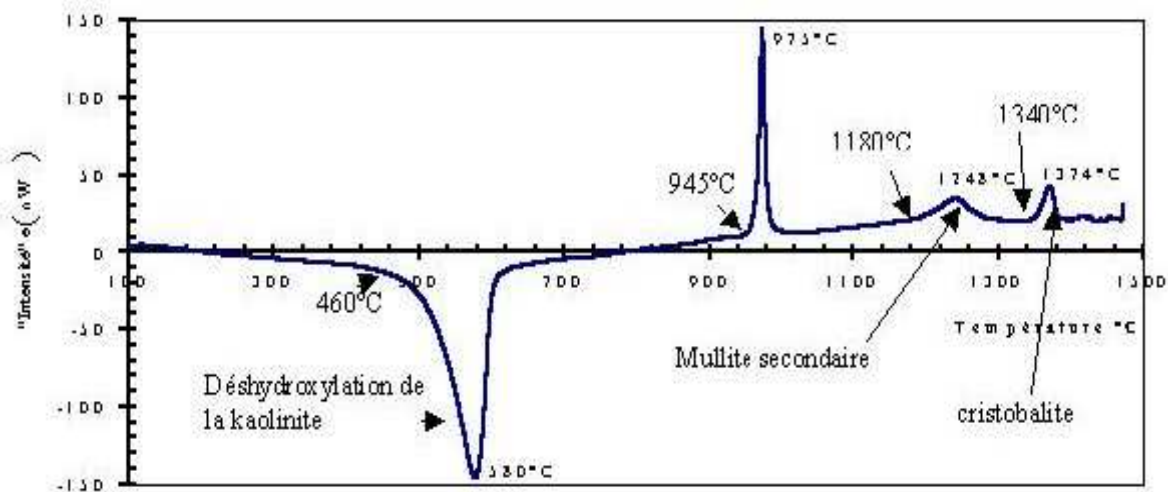


Figure 8 : Exemple d'analyse thermique différentielle d'un kaolin [16].

L'ATD identifie les régions de la température et l'importance des événements critiques pendant un séchage, mais en plus l'oxydation de carbone ou de soufre, l'effondrement structural d'argile, l'alpha et la bêta transition de quartz, les décompositions de carbonate, les recristallisations, les transitions de cristobalite, la température de solidification ou de solidus, la température de transition de verre (T_g), l'énergie de la réaction, capacité de chaleur, et d'autres.

La courbe ATD met en évidence 3 phénomènes :

IV-1-La déshydratation : (pic endothermique de faible amplitude vers 100°C)

Cette étape ne constitue pas une transformation majeure. Il s'agit d'eau physiosorbée dont le départ ne modifie pas la structure cristalline de l'argile. Le transport de la vapeur est un phénomène qui se produit lors de tout procédé de séchage. Le mouvement de la vapeur se fait soit par diffusion au sein du matériau même, soit par échange au niveau de la surface entre le matériau et son environnement. Si un produit peu humide de nature hygroscopique se trouve en

contact avec de la vapeur d'eau, il fixe celle-ci jusqu'à atteindre un état d'équilibre ; se phénomène est connue sous le nom d'adsorption. Le volume spécifique varie linéairement avec la teneur en eau jusqu'à une limite définie du type d'argile, au dessous de cette valeur le volume spécifique reste constant, en plus le séchage évoque des fissurations produisant un retrait maximal en surface alors que le cœur du produit, encore humide, garde ses dimensions.[29]

IV-2-La déshydroxylation : (pic endothermique de grande amplitude vers 500°C)

Il s'agit de la réaction au cours de laquelle les hydroxyles structuraux sont éliminés, il se forme d'autres phases.

Lorsque l'argile est calcinée, elle se transforme. Les hydroxyles du réseaux se réorganisent est peuvent favorablement modifier les propriétés de l'élasticité, opacité et caractère diélectrique, même la couleur peut changer ce qui est dû aux minérales et impuretés inorganiques et aux changements de l'état d'oxydation des éléments lourd, comme le fer, ou à la perte d'une partie du fer structural.

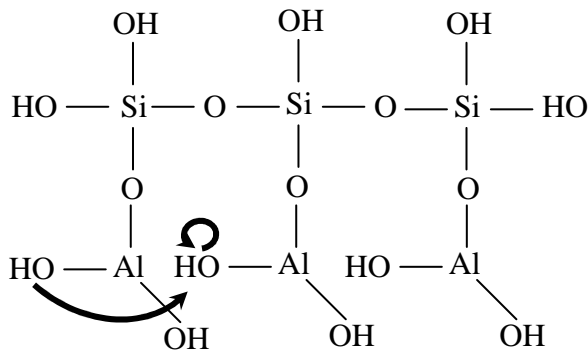
H.W.Taylor et ses collègues ont constatés que dans certains minéraux argileux la migration des protons d'un oxygène à l'autre dérange la neutralité électrique. Pour compenser cette perte de charge positive, une conter-migration aura lieu vers cette région. Pendant la dehydroxylation aucun oxygène est perdu, ce mécanisme est dit « non homogène » (fig. 9) [30].

Dans d'autre cas le mécanisme est appelé « homogène », où la perte d'oxygènes comme molécules d'eau est d'avantage ou moins uniforme dans tout un cristal.

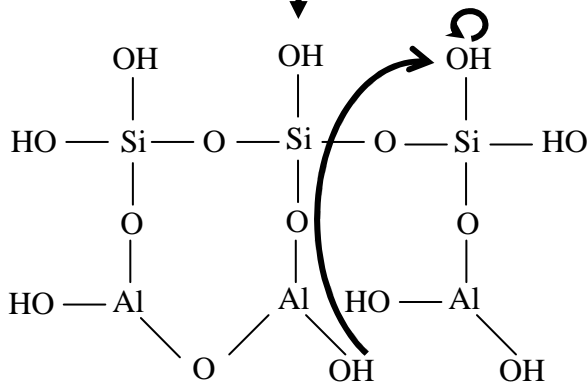
Dans l'espèce cristalline, comme la kaolinite et la montmorillonite, le taux de ce processus de délocalisation devient appréciable à 200-300°C. Dans la majeure partie du cristal, les constituants hydroxyles appartiennent aux cellules octaédriques puisque la force du lien électrostatique d'oxygène-cation est toujours partielle, alors que dans la couche tétraédrique, la force électrostatique du lien entre les oxygènes liant les coins adjacents de tétraédrique est 1. Il suit que la délocalisation implique les cellules octaédriques seulement. [31]

IV-3-La recristallisation : (pic exothermique vers 1000°C)

Dans cette phase un réarrangement structural se manifeste, comme par exemple la métakaolinite qui se transforme en mullite.



La déshydroxylation commence par une condensation entre les OH des Al - OH



Elle se poursuit par une condensation hétérogène entre les OH des Al - OH et les OH des Si - OH

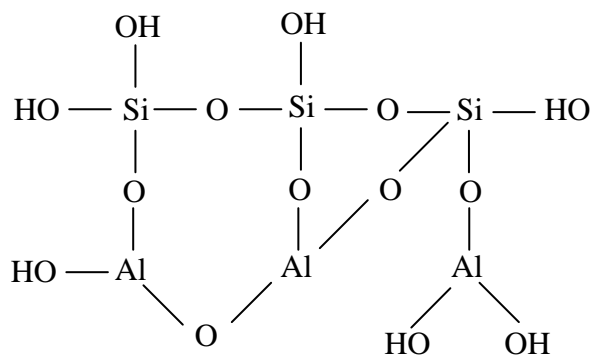


Figure 9 : Mécanisme simplifié de la transformation de la kaolinite en métakaolinite [30].

Chapitre 3 : Etude pratique et analyse des résultats

A- Introduction aux essais réalisés

I- Diffraction rayon X :

La diffraction des rayons X est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. En effet, cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches, cristaux, minéraux, pigments, argiles...) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels des atomes constitutifs.

Les corps cristallins peuvent être considérés comme des assemblages de plans réticulaires plus ou moins denses. Les plans contiennent les atomes : certains plans contiennent bien plus d'atomes que d'autres en fonction de la formule chimique du minéral. Ces plans réticulaires sont séparés par des distances caractéristiques (d) selon la nature du cristal ou du minéral considéré. Trois ou quatre distances réticulaires bien choisies permettent une reconstitution du réseau cristallin du minéral.

Les atomes s'organisent donc en plans réticulaires plus ou moins denses qui sont désignés par leurs coordonnées (h, k, l) dans un système de repérage de l'espace.

Avec un rayonnement de longueur d'onde suffisamment petit on peut obtenir des diffractions par les plans réticulaires. Cette réflexion est d'autant plus intense que le plan est « dense » c'est-à-dire riche en atomes.

La théorie a été élaborée concomitamment par W.L. Bragg et G.Wulff : on l'appelle la relation de Wulff-Bragg. Un faisceau de rayons X incident de longueur d'onde λ ne sera réfléchi par une famille de plan (h,k,l), que dans la mesure où il rencontre ces plans sous un certain angle θ dit angle de Bragg tel que :

$$\sin \theta = n\lambda / 2d_{(h,k,l)}$$

La position en 2θ est convertie en distance interréticulaire d par la loi de Bragg, afin d'avoir une valeur indépendante de la longueur d'onde des rayons X. L'intensité I de chaque pic est exprimée en pourcent, étant la hauteur du pic le plus intense. On constitue ainsi des bases de données, et le diagramme mesuré sur le produit inconnu est comparé de manière informatique à toutes les fiches des bases de données. La base de données la plus complète est la Powder diffraction file (PDF) de l'ICDD (ex-JCPDS : Joint committee on powder diffraction standards).

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet de distinguer les différentes formes de cristallisation d'un même composé (par exemple pour la silice, distinguer le quartz de la cristobalite). Cependant, elle ne peut généralement pas permettre d'identifier des composés amorphes.

La procédure d'identification des phases se fait en deux étapes : une étape de recherche dans une base (search), puis une confrontation des fiches probables avec ce qui est possible chimiquement (match) ; on parle donc fréquemment de search/match pour désigner cette procédure.

II- Essais sur ciment anhydre:

II -1-La finesse de mouture (finesse de Blaine) :

L'appareil utilisé pour déterminer la finesse de mouture de ciment est appelé «Perméabilimètre de Blaine». Cet appareil est schématisé sur la figure 10, il se compose pour l'essentiel d'une cellule dans laquelle est placé le ciment à tester et d'un manomètre constitué d'un tube en verre en forme de U rempli, jusqu'à son repère inférieur d'une huile légère. La cellule est équipée d'une grille en sa partie inférieure. Un piston sert à tasser le ciment dans la cellule sous un volume V défini.

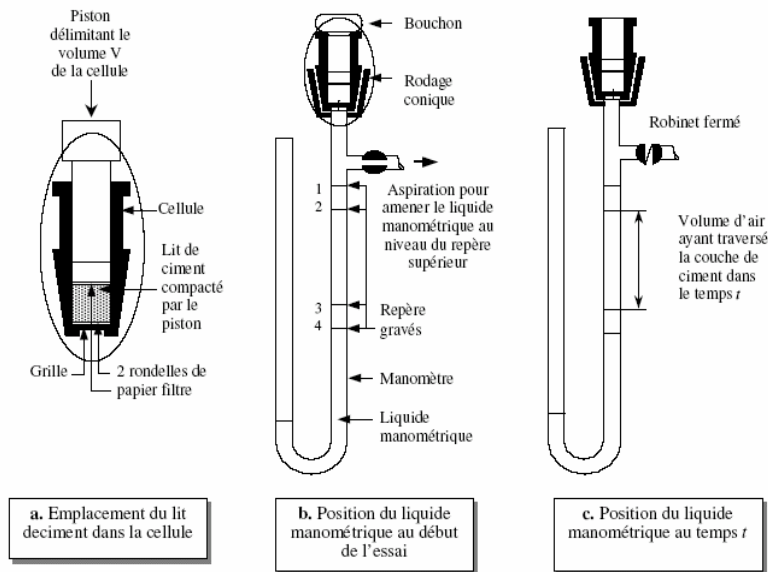


Figure 10 : Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine [4].

II-1-1-Conduite de l'essai :

-Il faut peser une masse (m_c) de ciment telle que la compacité (c) du ciment une fois tassé dans la cellule soit $c = 0.5$. La compacité est définie comme le rapport entre le volume absolu (v_c) de ciment compacté dans la cellule et le volume V de la cellule :

$$c = \frac{v_c}{V} = \frac{m_c}{V\rho_c} \Rightarrow m_c = cV\rho_c$$

Remarque: à Sour El-Ghozlane on utilise ; $m_c = \rho_c \cdot 1,837 \cdot 0,5$

La porosité (p) est définie comme le volume d'air occlus contenu dans le lit de ciment compacté rapporté au volume total :

$$p = \frac{V - v_c}{V} = 1 - c$$

-Cette masse (m_c) de ciment est mise en place dans la cellule puis compacté par le piston ; le lit de ciment ainsi compacté à un volume (V) ; la cellule est alors placée dans le rodage au sommet du manomètre.

-Placer la grille au fond de la cellule, et verser la quantité du liant en nivelant la couche supérieure. Le robinet étant ouvert, amener par une aspiration modérée le liquide manométrique au niveau du repère supérieure.

-Fermer le robinet ; enlever le bouchon ; déclencher le chronomètre lorsque le liquide atteint le repère n°2 sur le tube ; l'arrêter lorsque le liquide atteint le repère n°3. Relever le temps t_1 à 0.2s près et la température à 0.1°C près. La surface massique (S) est :

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

Dans cette expression (K) est la constante de l'appareil et (η) la viscosité de l'air à la température de l'essai (la norme en fourni les valeurs numérique en fonction de cette température).

Remarque : à l'usine Sour El-Ghozlane en utilise la formule de la façon suivante :

$$K_s = K \cdot \frac{1}{\rho_c} \cdot \frac{\sqrt{p^3}}{1-p} \cdot \frac{1}{\sqrt{0.1\eta}} = \frac{3015}{6,38} \cdot \frac{3,10}{\rho}$$

$$S = K_s \cdot \sqrt{t}$$

II-2- Masse volumique absolue :

Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue du ciment anhydre qui varie en fonction de la composition du ciment, tout en restant comprise entre 3,0 et 3,2 g/cm³.

On repère en comparant la masse (m_c) d'un volume connu de ciment (V_c) à la masse (m_t) d'un même volume d'un liquide dont la masse volumique (ρ_t) est connue. La masse (ρ_c) s'en déduit en écrivant:

$$\rho_c = \rho_t \cdot \frac{m_c}{m_t}$$

II-2-1- Conduite de l'essai :

-Remplir le pycnomètre de benzène, pétrole ou d'un liquide non réactif avec le ciment, jusqu'à ce que le niveau parvienne entre les divisions zéro et 1.

-Éviter de mouiller les parois lors du remplissage.

-Immerger le pycnomètre dans un récipient contenant de l'eau à 20±1 °C. Pendant l'équilibrage de température, peser une masse de ciment de 64 g à 0,1 g près.

-Repérer exactement le niveau atteint N_0 .

-Verser le ciment très lentement (en ¼ d'heure environ) dans l'appareil en prenant garde à ne pas laisser de dépôt sur les parois.

-Boucher le pycnomètre, l'incliner à 45° par rapport à la table et le faire rouler avec un mouvement de va-et-vient de manière à faciliter le départ de l'air. Replacer l'appareil dans le bain et lire le niveau N_1 du liquide après équilibrage de température.
La masse volumique absolue est donnée par le rapport:

$$\rho_c = \frac{64}{N_1 - N_0} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

III- Essai sur pâte de ciment :

III-1- La consistance :

La consistance de la pâte caractérise sa plus ou moins grande fluidité. Elle est une caractéristique, qui évolue au cours du temps. Pour pouvoir étudier l'évolution de la consistance en fonction des différents paramètres, il faut pouvoir partir d'une consistance qui soit la même pour toutes les pâtes étudiées.

L'objectif de cet essai est de définir une telle consistance dite « consistance normalisée », à l'aide d'un appareil dit « appareil de Vicat » (figure 11).

III-1-1-Conduite de l'essai :

- 500 g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 secondes.

-Mettre immédiatement le malaxeur en route à la vitesse lente pendant 90 s. Arrêter la machine pendant 15 s et ramener, dans la gâchée avec une petite truelle, la pâte adhérant à la cuve et se trouvant au delà de la zone de malaxage. Remettre la machine en route pour une durée de 90s à vitesse lente.

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

-Quatre minutes après le début du malaxage, la sonde est amenée à la surface supérieure de l'échantillon (moule tronconique) et relâchée sans élan. La sonde alors s'enfonce dans la pâte.

-Lorsqu'elle est immobilisée (ou après 30s d'attente), on mesure la distance « d » séparant l'extrémité de la sonde et la plaque de base.

Cette distance « d » caractérise la consistance de la pâte étudiée.

* Si « d » = 6mm ± 1mm, on dit que la consistance de la pâte étudiée est normalisée (consistance normalisée).

* Si « d » n'atteint pas cette valeur, il convient de refaire l'essai avec une valeur différente du rapport E/C jusqu'à atteindre la valeur recherchée de la consistance.

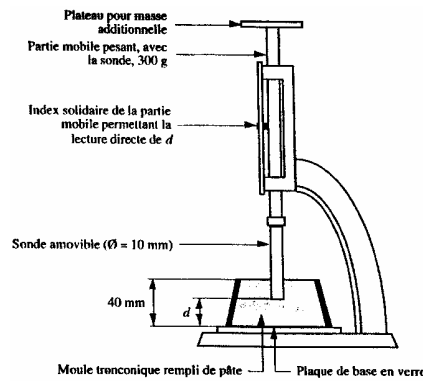


Figure 11 : Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance [4].

III-2-la prise :

Dès que le ciment anhydre a été mélangé avec de l'eau, l'hydratation commence et les propriétés de la pâte ainsi obtenues sont évolutives dans le temps. Tant que cette hydratation n'est pas trop avancée, la pâte reste plus ou moins malléable, ce qui permet de lui faire épouser par moulage la forme désirée. Mais au bout d'un certain temps, les cristaux d'hydrates prenant de plus en plus d'importance, le mélange change de viscosité et se raidit, on dit qu'il se fait priser.

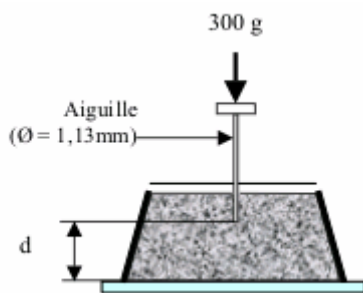


Figure 12 : Détermination du début de prise [4]

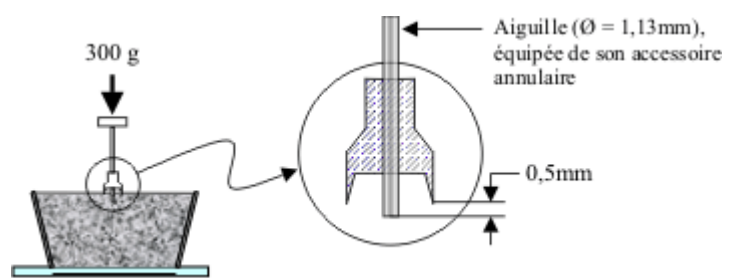


Figure 13 : Détermination de la fin de prise [4].

Le début de prise correspond au moment où l'on observe une augmentation de la viscosité, ou raidissement de la pâte, ce qui dans la pratique, se mesure au moyen d'une aiguille normalisée (appareil de Vicat) et correspond au temps écoulé depuis le gâchage de la pâte jusqu'au moment où l'aiguille s'arrête à une distance (d). De même, la fin de prise correspond au moment où l'aiguille ne s'enfonce plus dans l'anneau.

III-2-1- Conduite de l'essai:

- 500 g de ciment sont pesés et introduits dans la cuve du malaxeur. La quantité d'eau choisie est ajoutée au ciment en un temps compris entre 5 et 10 s.
- Mettre immédiatement en marche le malaxeur à vitesse lente pendant 90 s. Arrêter la machine pendant 15 s et ramener dans la gâchée avec une petite truelle la pâte adhérente à la cuve. Remettre le malaxeur en route pour une durée de 90 s à vitesse lente.
- La pâte est alors rapidement introduite dans le moule tronconique posé sur une plaque de verre, sans tassement ni vibration excessifs, arasé, puis placé sur la platine de l'appareil de Vicat.

-L'aiguille est amenée à la surface supérieure de la pâte et lâchée sans élan. Elle s'enfonce alors dans la pâte, et lorsqu'elle s'immobilise, ou au plus tard 30 s après l'avoir relâchée, on mesure la distance « d » entre l'extrémité de l'aiguille et le fond du moule. Cette distance doit être égale à $4 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$. (figure 12)

-Le « temps de fin de prise » est celui au bout duquel l'aiguille ne s'enfonce plus que de 0.5 mm, comme le montre le dispositif dans la figure 13.

III-3-Determination de la stabilité :

Il s'agit d'apprécier l'augmentation de volume que seraient susceptibles de provoquer au cours de la réaction d'hydratation les oxydes de calcium ou de magnésium contenus dans le ciment.

III-3-1- Conduite de l'essai à chaud :

- Il faut confectionner une pâte de consistance normalisée qui sera introduite dans des moules (figure 14). Après remplissage les moules sont conservés et couverts 24 h dans la salle ou l'armoire humide.

- Au bout de ce temps, il convient de mesurer à 0.5 mm près l'écartement A entre les pointes des aiguilles.

- Les moules sont entreposés dans le bain d'eau à 20 °C qui est porté à ébullition en 30 min.

- Ce bain est maintenu à ébullition pendant $3 \text{ h} \pm 5 \text{ min}$. Soit B l'écartement entre les pointes des aiguilles au bout de ce temps. C est l'écartement des aiguilles après refroidissement du moule à 20 °C.

La stabilité est caractérisée par la valeur (C - A) exprimée en mm à 0.5 mm près. La norme ciment NF P 15-301 exige que la stabilité (C - A) soit inférieure ou égale à 10 mm.

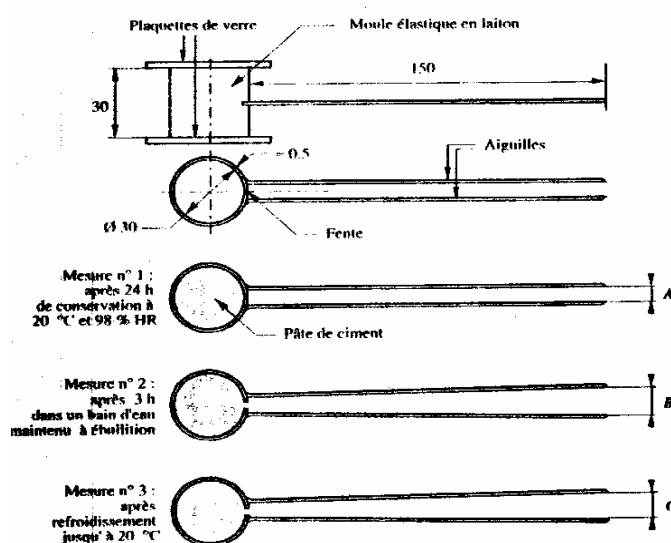


Figure 14 : Essai de stabilité avec les aiguilles LE CHATELIER [4].

IV- Essai sur mortier :

Sa composition est définie par la norme EN 196-1. Le mortier doit être composé en masse, d'une partie de ciment, de trois parties de sable normalisé et d'une demi partie d'eau (le rapport eau / ciment = 0.50).

Chaque gâchée pour trois éprouvettes d'essai doit comporter $450 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$ de ciment, $1350 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$ de sable et $225 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ d'eau. Le ciment, le sable, l'eau et l'appareillage doivent être à la température du laboratoire ($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$). Les pesées doivent être effectuées au moyen d'une balance dont la précision est de $\pm 1 \text{ g}$.

IV-1- Malaxage du mortier :

Il faut malaxer chaque gâchée de mortier mécaniquement au moyen du malaxeur spécifié. Le malaxeur étant en position de marche (mais pas en fonctionnement) :

- * Verser l'eau dans le récipient et introduire le ciment.
- * Mettre alors immédiatement le malaxeur en marche à petite vitesse et après 30 s, introduire régulièrement tout le sable (pendant les 30 s suivantes).
- * Mettre le malaxeur à sa vitesse la plus grande et continuer à mélanger pendant 30s supplémentaires.
- * Arrêter le malaxeur pendant 1 min 30 s. Pendant les 15 premières secondes, enlever au moyen d'une raclette en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci.
- * Reprendre ensuite le malaxage à grande vitesse pendant 60 s.

IV-2-Préparation des éprouvettes :

Les éprouvettes sont de forme prismatique 40 mm x 40 mm x 160 mm. Elles doivent être moulées le plus vite possible après la confection du mortier.

Le moule métallique à trois alvéoles et sa hausse étant fermement fixés à la table à choc, on introduit la première des deux couches de mortier. La couche est étalée uniformément en utilisant la grande spatule puis serrée par 60 chocs. La deuxième couche est alors introduite, nivelée avec la petite spatule et serrée à nouveau par 60 chocs.

Le moule est enlevé de la table à choc, et après avoir retiré la hausse, on enlève l'excédent de mortier par arasage. La surface des éprouvettes est ensuite lissée.

IV-3-Conservation des éprouvettes :

Le moule rempli de mortier est convenablement identifié, puis placé jusqu'au moment du démoulage couvert d'un couvercle, sur un support horizontal dans une armoire humide ($20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, humidité relative supérieure ou égale à 90 %).

Le démoulage est effectué entre 20 h et 24 h après le moulage. Les éprouvettes sont alors marquées convenablement avec un crayon résistant à l'eau.

IV-4-Conservation des éprouvettes dans l'eau :

Les éprouvettes marquées sont immergées dans l'eau à $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ dans des récipients adéquats jusqu'au moment de l'essai. Les éprouvettes doivent être retirées de l'eau, essuyées au maximum 15 min avant que l'essai soit exécuté.

IV-5- Résistances mécaniques des mortiers :

Pour la détermination de la résistance à la flexion, on utilise la méthode de la charge concentrée à mi portée au moyen du dispositif de flexion normalisé. Les demi-prismes obtenus dans l'essai de flexion doivent être essayés en compression sur les faces latérales de moulage sous une section de 40 mm x 40 mm.

IV-5-1-Résistance à la flexion :

Placer le prisme dans le dispositif de flexion avec une face latérale de moulage sur les rouleaux d'appui et son axe longitudinal perpendiculaire à ceux-ci. Appliquer la charge verticalement par le rouleau de chargement sur la face latérale opposée du prisme et l'augmenter de $50 \text{ N/s} \pm 10 \text{ N/s}$, jusqu'à rupture.

Conserver les demi-prismes humides jusqu'au moment des essais en compression. La résistance en flexion R_f (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

$$R_f = \frac{1.5.F_f.l}{b^3}$$

où :

R_f : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

b : est le côté de la section carrée du prisme, en millimètres.

F_f : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

l : est la distance entre les appuis, en millimètres.

IV-5-2-Résistance à la compression :

*Centrer chaque demi-prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à $\pm 0.5 \text{ mm}$ près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.

*Augmenter la charge avec une vitesse de $2400 \text{ N/s} \pm 1\ 200 \text{ N/s}$ durant toute l'application de la charge jusqu'à la rupture (compenser la décroissance de vitesse de la charge à l'approche de la rupture).

*La résistance en compression R_c (en N/mm^2) est calculée au moyen de la formule :

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

où:

R_c : est la résistance en compression, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

F_c : est la charge maximale à la rupture, en newtons.

V- Essai sur béton :

Afin de confectionner un béton, un mélange doit être soigneusement élaboré. Multiple sont les méthodes proposées par les spécialistes, tels que Bolomey, Abrams, Faurey, Vallette, Dreux et Gorisse, pour arriver à produire un mélange optimal de granulats, de ciment et d'eau d'un mètre cube, dont les qualités soient celles recherchées pour la construction d'un ouvrage.

Ces méthodes sont nombreuses et il n'est pas possible de les citer toutes. Ils existent celles qui sont dites à « granularité continue » lorsque l'analyse du mélange constituant le béton donne, sur le graphique granulométrique, une courbe s'élevant d'une façon continue, ces méthodes permettent d'obtenir des bétons plus plastique et de bonne ouvrabilité. On dit par contre que l'on a une « granularité discontinue » lorsque la courbe granulométrique correspondante présente un palier qui équivaut à un manque d'éléments intermédiaires, ce qui conduit en général à des résistances en compression un peu supérieure, mais parfois au détriment de l'ouvrabilité.

Parmi ces méthodes nous avons choisi la méthode Dreux-Gorisse, ou se qu'on appel « méthode des abaques ».

Par sécurité, la résistance visée, représente une majoration de 15% de la résistance désirée.

Ainsi la résistance visée est, $\sigma'_c = \sigma_{c28} + 15\% \sigma_{c28}$ ou $\sigma'_c = 1.15\sigma_{c28}$

V-1- Dosage en ciment et en eau :

Le dosage en eau et ciment dépend de la résistance visée, de la qualité du ciment et des granulats.

Ainsi expérimentalement, on établie une relation entre l'ensemble de ces paramètres.

$$\sigma'_c = \sigma' \cdot G \cdot \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Avec:

σ'_c : résistance visée à 28 jours

C: dosage du ciment en kg/m^3 de béton

E: dosage de l'eau en kg/m^3 de béton

σ' : Classe vraie du ciment en MPa

G : coefficient granulaire. Ce coefficient représente la qualité des granulats.(tableau 8)

Expérimentalement, il est établi que cette qualité dépend du granulat, mais également de son diamètre selon les valeurs suivantes :

Qualité des granulats	Dimension D des granulats		
	D > 16mm	Moyens 25 < D < 40mm	Gros > 63mm
Excellente	0.55	0.60	0.65
Bonne, courante	0.45	0.50	0.55
Passable	0.35	0.40	0.45

Tableau 8 - Valeurs approximatives du coefficient granulaire G.[5]

Cette relation permet de déterminer le rapport C/E.

Il est à observer au travers cette relation que le dosage en ciment est d'autant plus important que la résistance visée du béton est forte. Inversement, le dosage en ciment diminue lorsque la résistance du ciment augmente. Pour une résistance visée, Il y a également moins besoin de ciment lorsque la qualité ou la dimension des granulats augmentent.

Le dosage en eau dépend également de l'ouvrabilité désirée. Ainsi en intégrant l'ouvrabilité désirée, expérimentalement, et à partir du rapport C/E, il est possible de déterminer le dosage en ciment par l'abaque (figure 15) suivant.

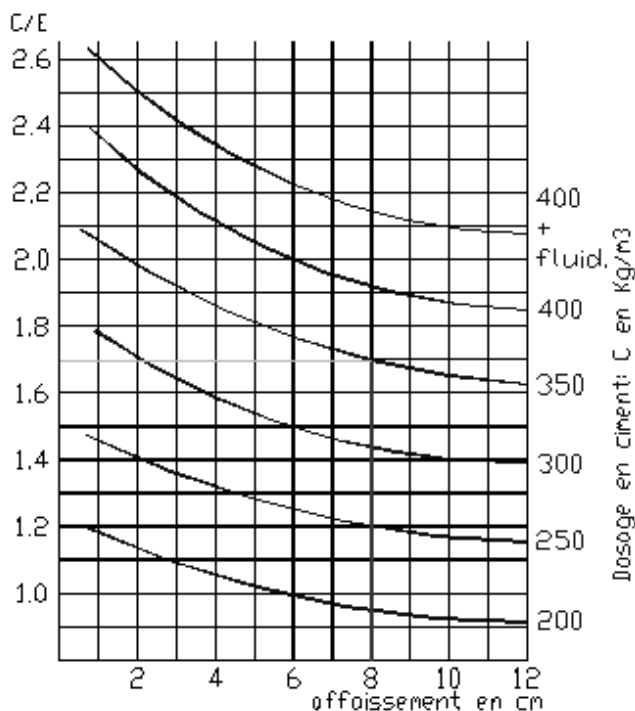


Figure 15 : Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment à prévoir en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désiré [5].

La détermination du dosage en ciment s'obtient par cet abaque à double entrée. En abscisse, la valeur de l'affaissement désirée et en ordonnée le rapport C/E. L'intersection des deux entrées, indique la sortie, la courbe donnant le dosage en ciment en kg. Cette intersection des deux entrées peut se faire directement sur une courbe de dosage en ciment, dans le cas contraire la courbe du dosage en ciment est obtenue par extrapolation de celles connues.

De même le dosage en ciment est limité à 400 kg/m^3 de béton en place. Au-delà le ciment et l'eau seraient en trop forte concentration dans le béton. Cela aurait pour effet de produire des fissures de retrait.

Ainsi, pour des rapports C/E et une ouvrabilité à atteindre qui nécessiteraient plus de 400kg de ciment, le dosage en ciment est limité à 400kg et l'ouvrabilité désirée est atteinte en ajoutant un fluidifiant au béton.

V-2- Ajustement du dosage en eau :

Le dosage en eau est à ajuster. En effet L'eau doit pouvoir humidifier tous les grains du mélange. Or pour humidifier un grain, il faut d'autant plus d'eau que son diamètre est petit (tableau 9). La quantité d'eau dépend donc également du diamètre des grains à humidifier. Le dosage en eau déterminé est indiqué pour mouiller tous les grains du mélange granulaire d'un diamètre représentatif maximal, $D=25\text{mm}$. Pour les autres diamètres, il faut majorer ou minorer ce dosage selon ce diamètre, D .

Diamètre en mm	5	10	16	25	40	63	100
Correction en %	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

Tableau 9 – Correction en pourcentage sur le dosage en eau [5].

Partie 2 : Essais et analyse des résultats

I- Analyse des paramètres chimiques des ajouts :

I-1-Analyse minéralogique :

L'analyse des deux échantillons a été réalisée au laboratoire minéralogie du CETIM-Boumerdes (Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction). Dans notre cas une analyse semi estimative a été évaluée sur la base des résultats chimiques (Tableau 10).

En effet les deux diffractogrammes (figure 12, 13) sont des superpositions de différents pics peu ou plus intense, on peut citer par exemple les angles θ de certains minéraux :

Le quartz : 20.85 - 26.5

La calcite : 29.4

La dolomite : 30.94

La kaolinite : 12.35° - 19.85° – 24.9°

L'illite : 19.70° - 29.36°

Ces diffractogrammes comprenant des phases majoritaires telles que la calcite, le quartz et les phyllosilicates significatif d'un climat tempéré, et des phases secondaires de feldspath, de gypse et des minéraux ferrugineux. On d'autre terme des minéraux détritiques comme les phyllosilicates et le quartz et des minéraux carbonatés tels que la calcite et la dolomite.

La calcite et la dolomite ont pour source le calcaire, car à leur décomposition ils libèrent respectivement 56% et 30% de calcite, les phyllosilicates sont la source de la fraction argileuses des deux échantillons, le quartz source de silice étant généralement un minéral associé.

I-2-Analyse chimique :

La fluorescence X est une technique spectrale non destructive exploitant la photoluminescence des atomes dans le domaine des rayons X, pour établir la composition élémentaire d'un échantillon. L'excitation des atomes généralement par un faisceau de rayons X ou par bombardement avec des électrons, génère des radiations spécifiques après retour à l'état fondamental de l'atome. Le spectre de fluorescence X a l'avantage de dépendre très peu de la combinaison chimique de l'élément, ce qui offre une détermination précise, à la fois quantitative et qualitative. L'analyse des deux échantillons a été réalisée au laboratoire minéralogie du CETIM-Boumerdes selon la norme NF P15-467 avec 20 mg de chaque matériau (Tableau 11).

L'analyse chimique des deux échantillons montre que ces deux matériaux sont essentiellement riche en silice (surtout la vase) est on oxyde de calcium, et en deuxième degré d'alumine et d'oxyde ferrique. La concentration élevée d'oxyde de silicium est due à la présence du quartz dans les deux échantillons. La kaolinite est source d'alumine pour cela sa concentration dans la vase est plus élevée que dans l'argile gréseuse. Quand à la calcite elle est source d'oxyde de calcium. Les sources de Fe_2O_3 , telles que, magnétite, limonite, sidérite, sans manquante c'est pour cela que sa concentration est faible.

La perte au feu est élevée, à cause de la présence de calcite et signe d'une présence importante de matières organiques.

Avec une composition assez riche de toutes sortes de minéraux on peut conclure que les deux ajouts sont des marnes argileuses.

Minéraux	Composition	Classification	Marne rouge	Vase
Quartz	SiO ₂	Oxyde de silicium	17	22
Calcite	CaCO ₃	Carbonate anhydre	30.5	30
Dolomite	CaMg(CO ₃) ₂	Carbonate anhydre	16.5	----
Feldspath plagio.			01	----
Gypse	CaSO ₄ .2H ₂ O	Sulfate hydraté	02	----
Minéraux Ferrugineux	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄		03	05
Kaolinite	(K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe)(Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .H ₂ O	Phyllosilicate	----	11
Illite/Muscovite	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH,F) ₂	Phyllosilicate	20	20
Chlorite	(Fe,Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	Phyllosilicate	09	12

Tableau 10 – Analyse minéralogique des ajouts cimentaires.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PaF
Argile gréseuse	32.96	6.87	3.01	23.24	5.80	1.19	1.96	0.01	24.46
Vase	37.37	13.52	5.00	17.02	2.75	0.36	1.92	0.45	20.73

Tableau 11 – Analyse chimique des ajouts cimentaires.

I-3-Analyse thermique différentielle :

Déjà déclaré, le principe consiste à suivre l'évolution de la différence de température entre l'échantillon à étudier et un corps témoin inerte. L'analyse des matériaux étudiés a été réalisée au sein du laboratoire thermique du CRND-DRARIA (Centre de Recherche Nucléaire et Développement). Les analyses sont réalisées sous balayage d'un gaz inerte (l'argon), pour éviter toute réaction des matériaux à étudier, les autres conditions expérimentales sont les suivantes :

- Le matériau est finement broyé et tamisé à 100µm.
- La masse de l'échantillon est de 15 mg.
- La vitesse de montée de température est de 10°C/mn.
- L'échantillon témoin est de α-aluminium oxyde.
- Le domaine de température va de l'ambiance à 1200°C.

Les variations de températures sont reportées en fonction du temps et de la température. La courbe enregistre les pertes d'eau (réactions endothermiques généralement) mais aussi les recristallisations et les recombinaisons (réactions exothermiques), comme apparaît dans les figures 14 et 15.

Pour la vase on observe deux pics distincts, le premier est plus large car il se produisent deux phénomènes l'un est la déhydroxylation de la Kaolinite, l'autre c'est la chlorite entre 500 et 600°C, le deuxième pic est la déhydroxylation de l'illite qui se produit entre 700 et 900°C. De ce qui est l'argile gréseuse c'est la déhydroxylation de la chlorite puis de l'illite.

Donc suivent le protocole de calcination on doit soustraire 80°C du second pic pour chaque échantillon, alors pour la vase le degré de calcination sera 750°C, pour l'argile gréseuse c'est 780°C. Le temps de cuisson sera pour les deux matériaux d'une durée de 5 heures est on a pu déjà constaté un changement de couleur d'un rouge ocre de l'argile gréseuse vert un rouge brique, et d'une couleur verte à une couleur rouge de la vase.

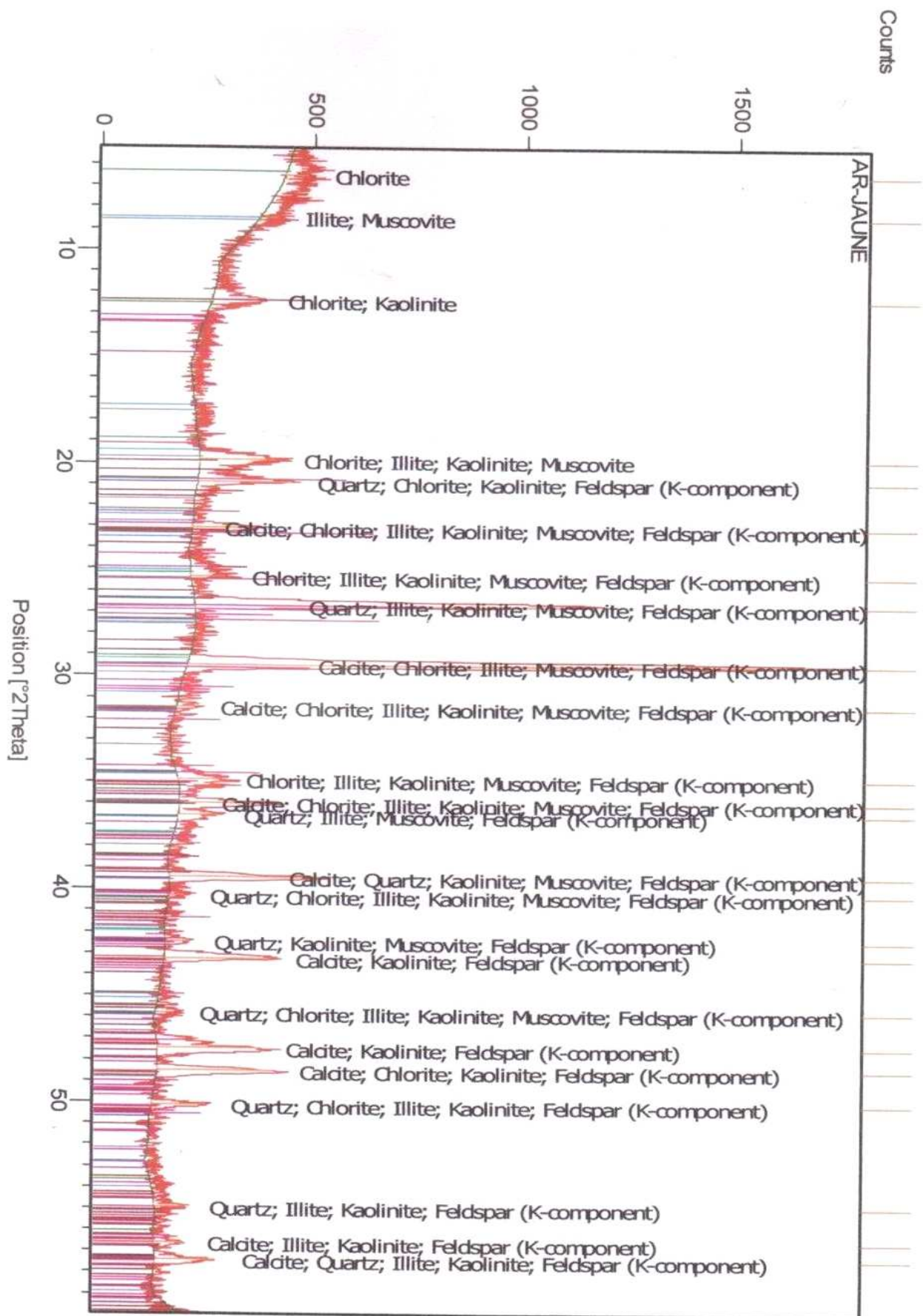


Figure 16 : Analyse minéralogique de la vase.

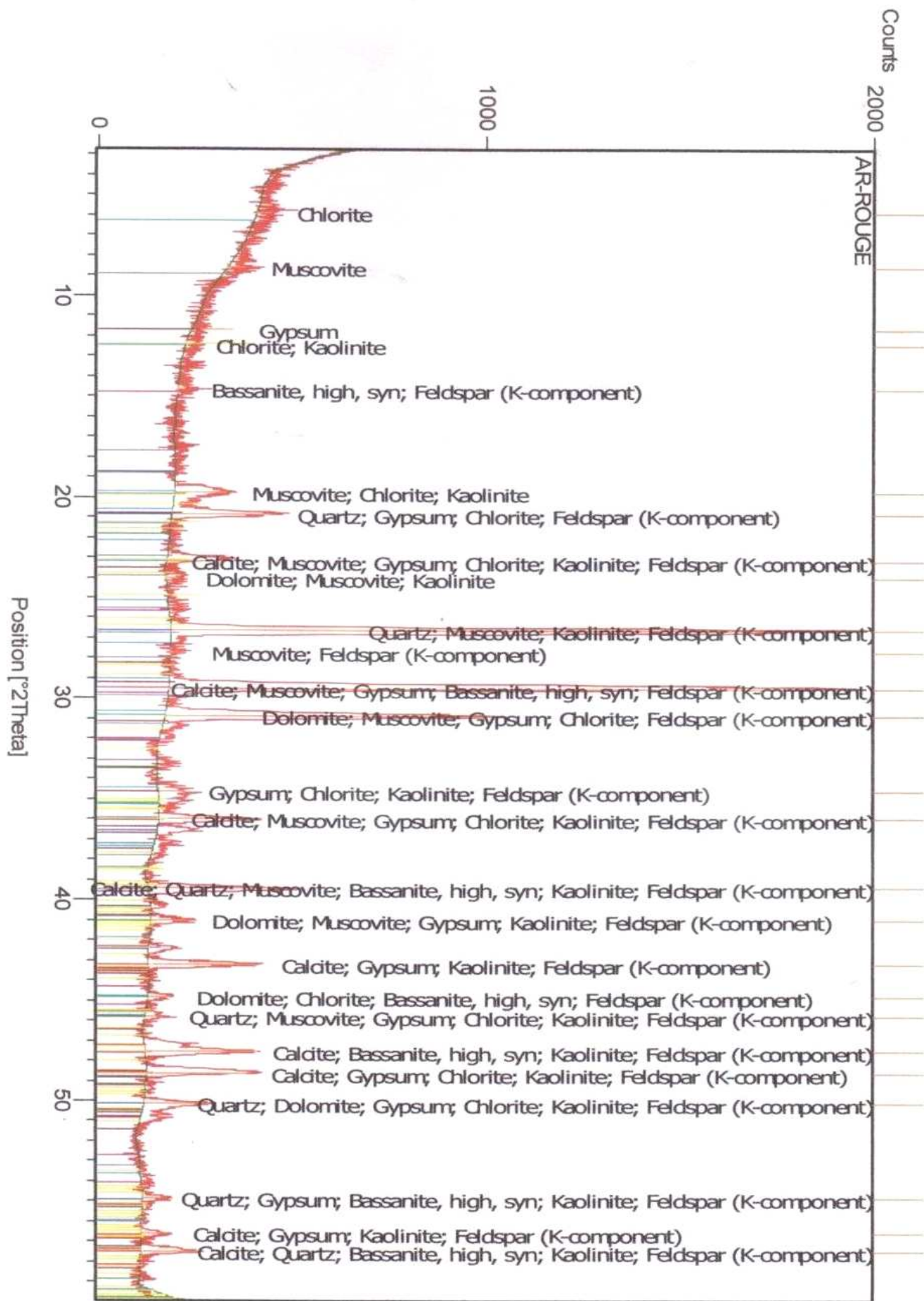


Figure 17 : Analyse minéralogique de la marne argileuse rouge.

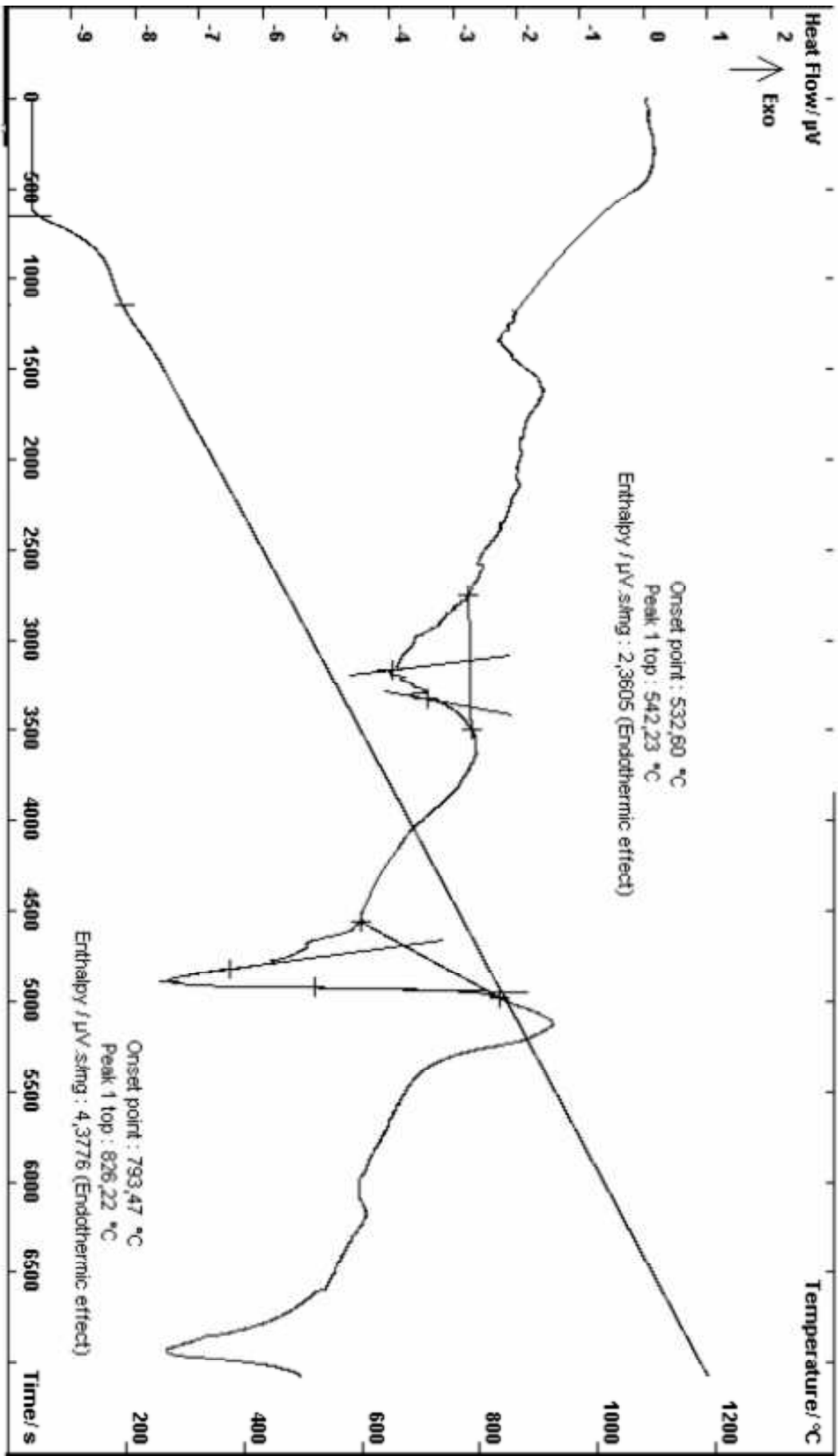


Figure 18 : Analyse thermique différentielle de la vase.

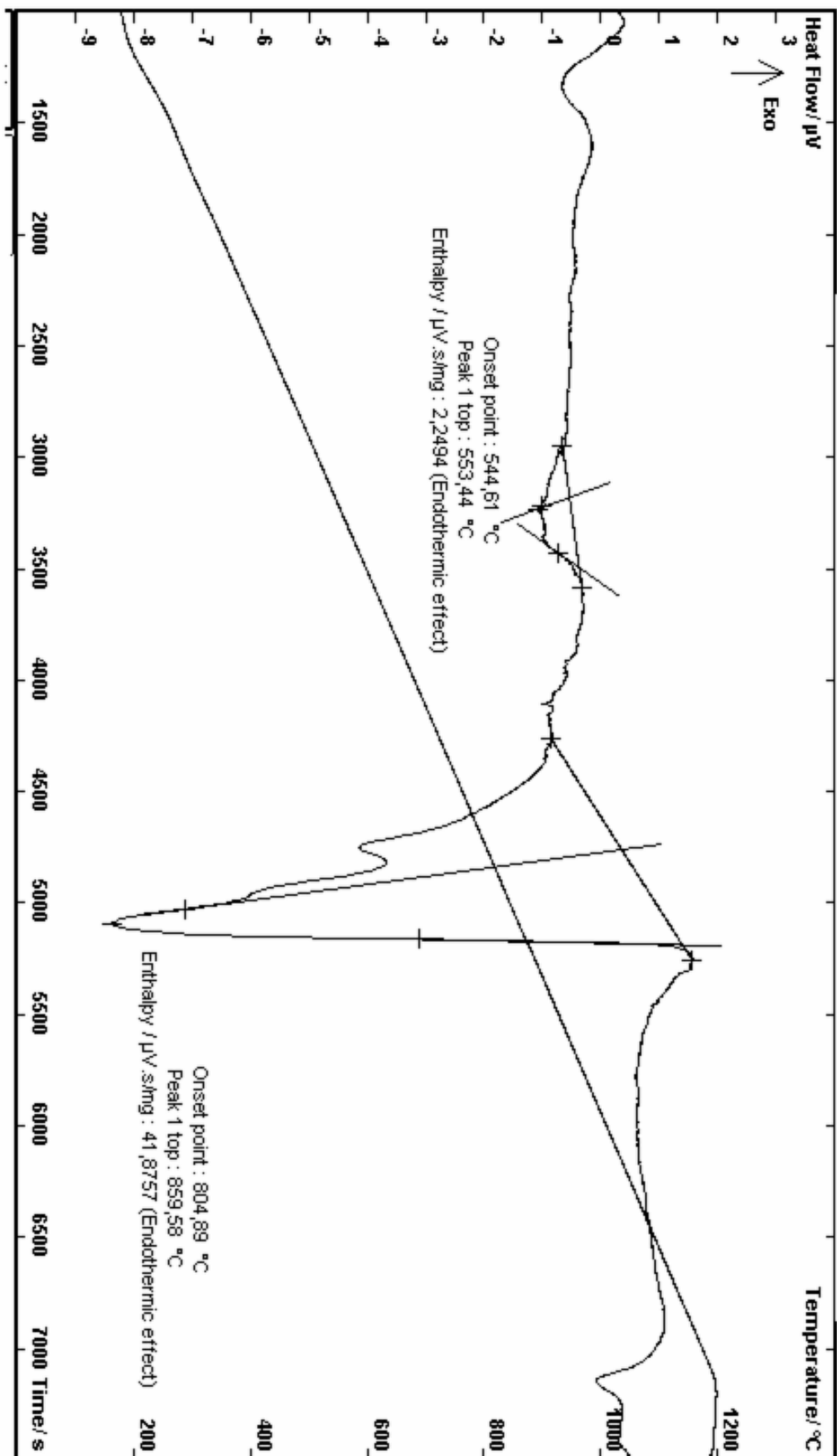


Figure 19 : Analyse thermique différentielle de la marne argileuse rouge.

II- Analyse des propriétés des ciments :

Les différentes variantes des ciments sont obtenues avec un mélange de clinker, de gypse et les deux marnes calcinées ; La marne calcaire nommée (R) et la vase nommée (V), avec différent pourcentage suivant le tableau 12 ainsi dessous.

Clinker %	Gypse %	Ajout R %	Ajout V %
95	5	0	0
85	5	10	-----
75	5	20	-----
65	5	30	-----
85	5	-----	10
75	5	-----	20
65	5	-----	30

Tableau 12 - Différentes variantes des ciments étudiées

II-1-Analyse des propriétés chimiques des ciments :

Cette analyse faite au sein des laboratoires de la cimenterie de Sour EL-Ghozlane, est résumée au tableau 13. Après un séchage, broyage, et passage en QCX on a déduit les résultats suivants :

*Selon la norme EN 197-1, la plupart de nos variantes répondent aux exigences, telles que la perte au feu qui est inférieure à 5%, la teneur en sulfate (mesure de SO₃) inférieure à 3.5%, et la teneur MgO est nettement inférieure à 3% ce qui favorise la broyabilité.

*Les différents modules MS, MA, sont dans les plages de données acceptables. Pour MH seul R30 et V30 sont en dessous de l'intervalle ce qui veut dire qu'on aura des résistances initiales faibles.

De ce qui est le module LSF (degré de saturation en chaux), les normes établissent un intervalle entre 85 et 100, plus le standard de chaux est élevé, plus les résistances du ciment le seront aussi. Par ailleurs, un standard en chaux élevé influe négativement sur la stabilité de volume du ciment hydraté (teneur en chaux libre). A chaque augmentation du pourcentage d'ajout il y a une diminution du taux de CaO, mais aussi une augmentation du dénominateur et surtout le silicium qui est présent en quantité considérable dans les ajouts.

Pour l'indice d'hydraulicité (ou indice de Vicat) tout les variantes ont un indice acceptable et même supérieure à 0.5 ce qui prouve leurs très bonnes résistances chimiques.

	Clinker	Gypse	CPA	R10	R20	R30	V10	V20	V30
SiO₂	22.14	7.18	21.93	23.77	25.61	26.30	23.93	26.18	28.49
Al₂O₃	5.23	2.25	5.53	5.91	6.21	6.37	5.98	7.57	8.63
Fe₂O₃	3.03	1.06	2.98	3.04	3.11	3.21	3.04	3.34	3.60
CaO	65.49	31.37	63.31	60.36	56.96	53.58	60.72	56.78	52.64
MgO	0.07	2.42	0.08	0.99	0.70	0.79	0.84	0.44	0.34
K₂O	0.94	0.47	1.09	1.37	1.57	1.83	1.41	1.32	1.39
Na₂O	0.13	0.00	0.13	0.13	0.14	0.12	0.13	0.13	0.12
SO₃	1.18	34.42	0.00	1.81	1.83	1.95	1.70	1.61	1.54
PaF	0.00	20.80	1.78	2.62	3.87	5.81	2.25	2.61	3.08
<hr/>									
LSF	93.38	133.79	90.62	79.94	70.27	64.37	79.86	67.27	57.03
Module silicique	2.68	2.17	2.58	2.66	2.75	2.75	2.65	2.40	2.33
Module aluminoferrique	1.73	2.12	1.86	1.94	2.00	1.98	1.97	2.27	2.40
Indice d'hydraulicité de vicat	0.42	0.28	0.43	0.48	0.55	0.60	0.49	0.59	0.70
Module hydraulique	2.15	2.99	2.08	1.84	1.63	1.49	1.84	1.53	1.29

Tableau 13 – Analyse chimique des différentes variantes.

II-2-Analyses des propriétés physiques des ciments :

II-2-1-Masse volumique :

La figure 16 montre le volume du benzène, qui est en constante augmentation dans le pycnomètre. Appliquant la formule M/V (masse du ciment toujours constante est égale à 64g), on obtient la figure 17 qui montre la masse spécifique du ciment. Cette dernière diminue avec chaque augmentation du pourcentage d'ajouts dans les deux cas, ceci est dû aux particules qui ont un caractère légèrement expansif, il gonfle en compactant les particules du ciment, alors ce gonflement provoque une augmentation du volume.

Les teneurs de l'alumine peuvent être supposées constantes, entre 5 - 7%, donc c'est la teneur des silicates qui semble conditionner la masse volumique en constante augmentation à chaque surplus d'ajouts, car le seul élément expansif est le silicate d'alumine (SiO_2Al), en ajoutant à cela les pourcentages de chaux et en sulfates, ces deux éléments peuvent aussi contribuer à des phénomènes d'expansion.

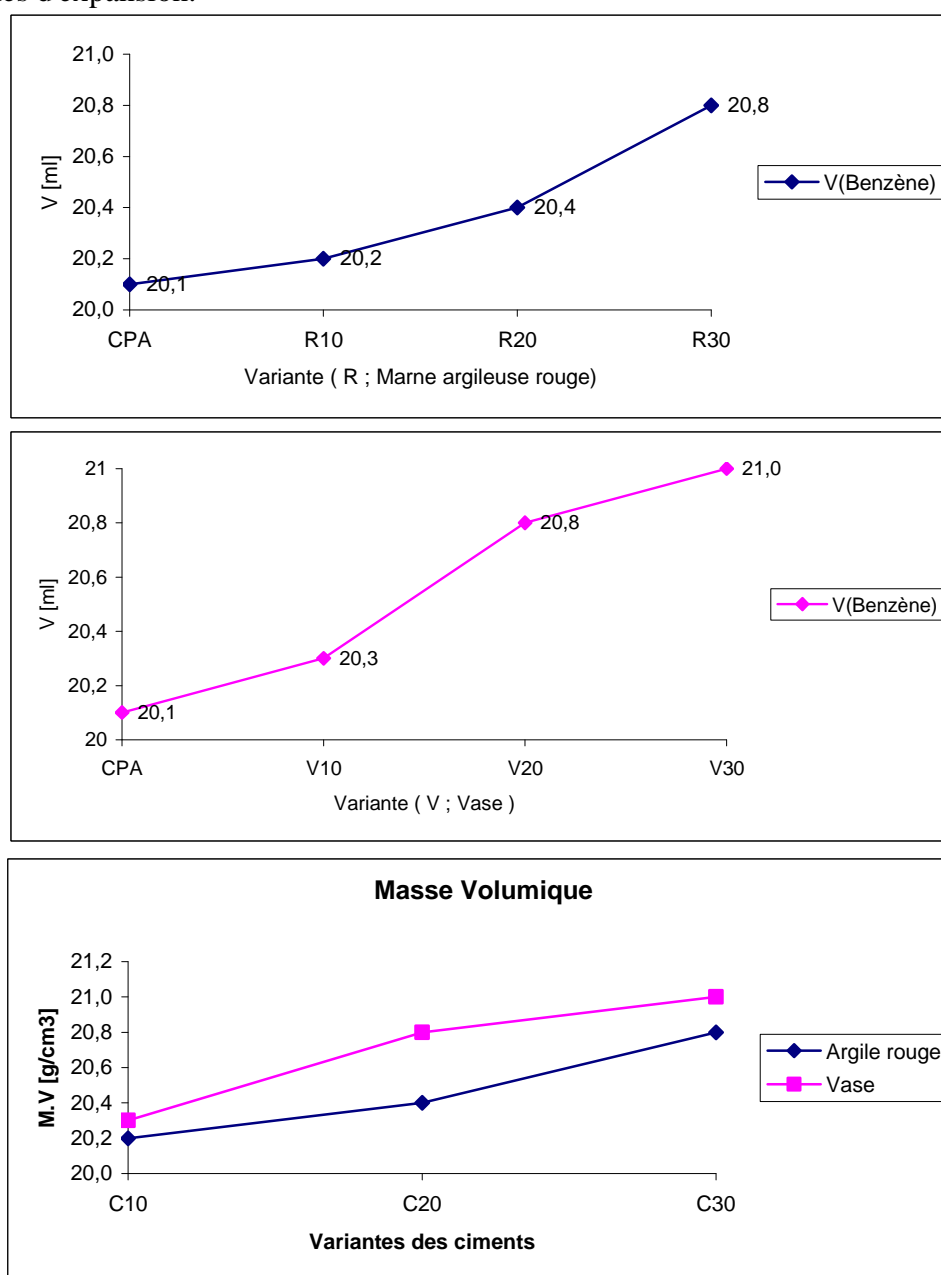


Figure 20 : La masse volumique absolue du ciment en fonction du benzène.

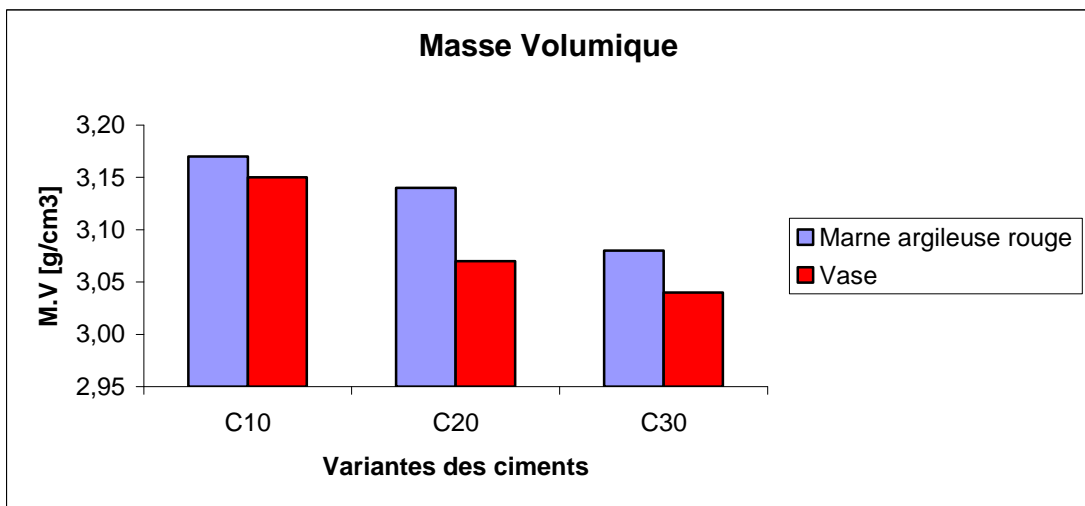
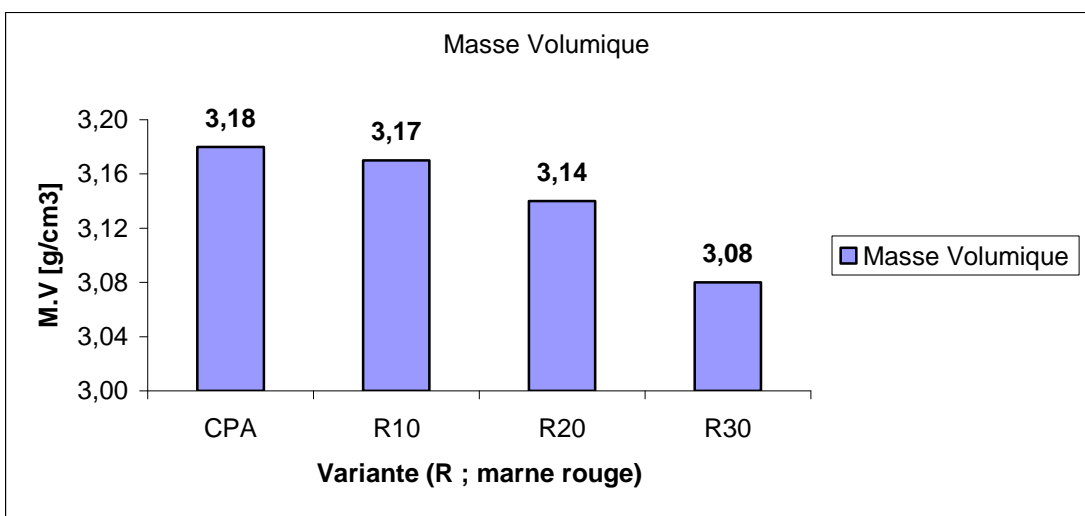
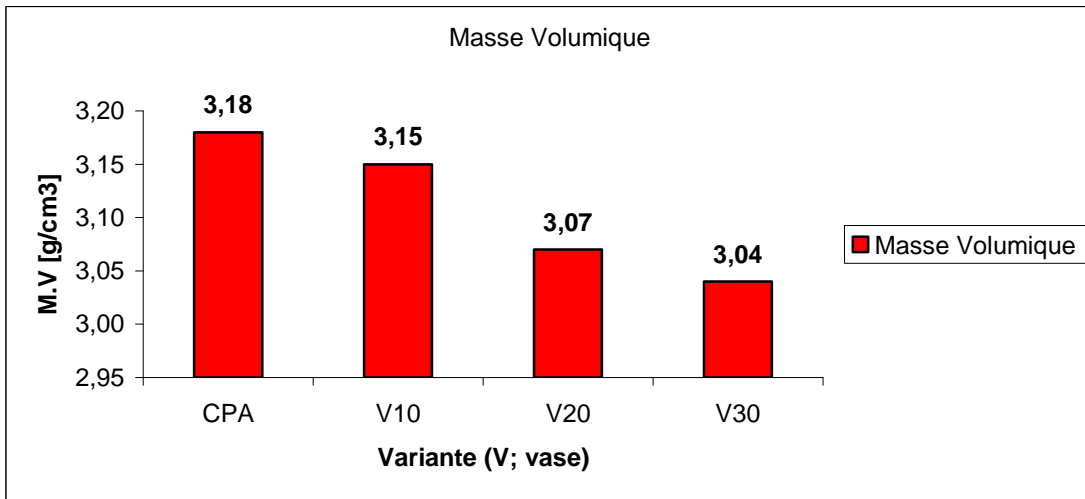


Figure 21 : Masse volumique absolue des deux variantes de ciment.

II-2-2- Consistance normale :

La figure 18 montre que le volume d'eau est en relation linéaire avec l'augmentation du taux d'ajout. La pâte de ciment doit avoir une consistance telle qu'elle puisse maintenir les grains de ciment forment une suspension stable dans l'eau. On remarque dans la figure 19 que le rapport E/C augmente avec l'augmentation du pourcentage d'ajout, cela est dû à la nature d'ajouts qui absorbe une partie importante de l'eau destinée à l'hydratation du ciment, ce qui réduit la quantité d'eau disponible pour l'hydratation du ciment anhydre et la formation des hydrates comme la portlandite et l'ettringite. Sans oublier la perte au feu un petit peu élevée des variantes attribuée principalement à la teneur résiduelle en carbone.

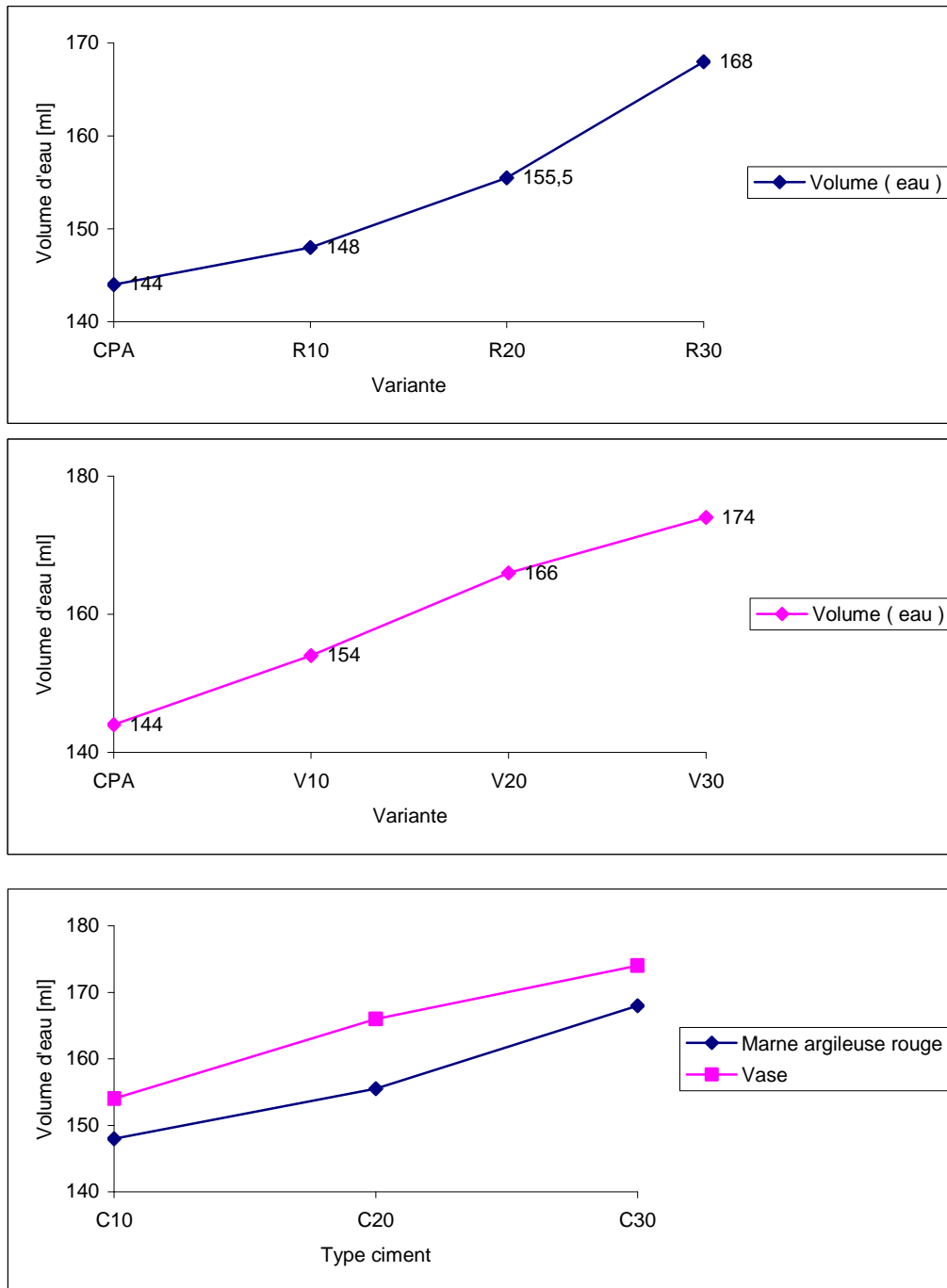


Figure 22 : Le volume d'eau requis pour avoir une consistance normale de 6 ± 1 mm.

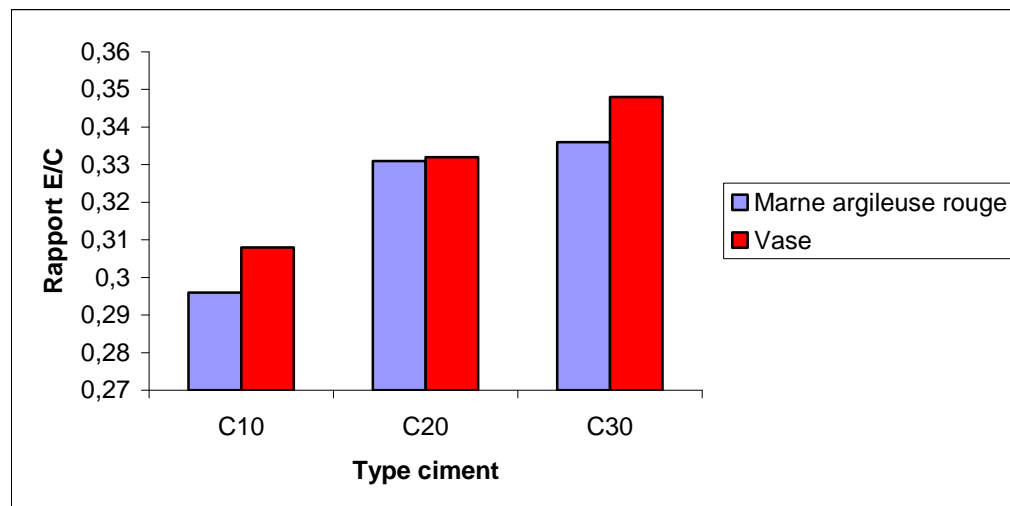
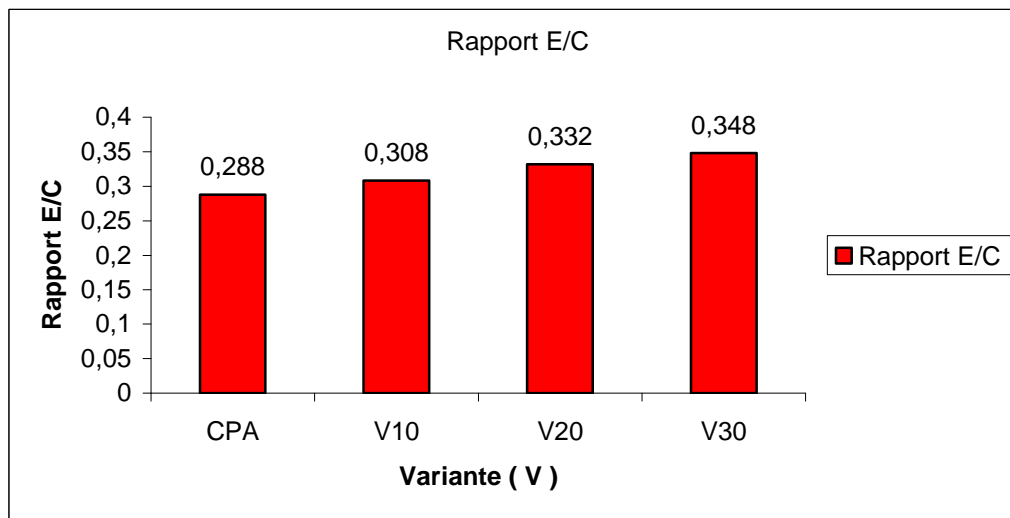
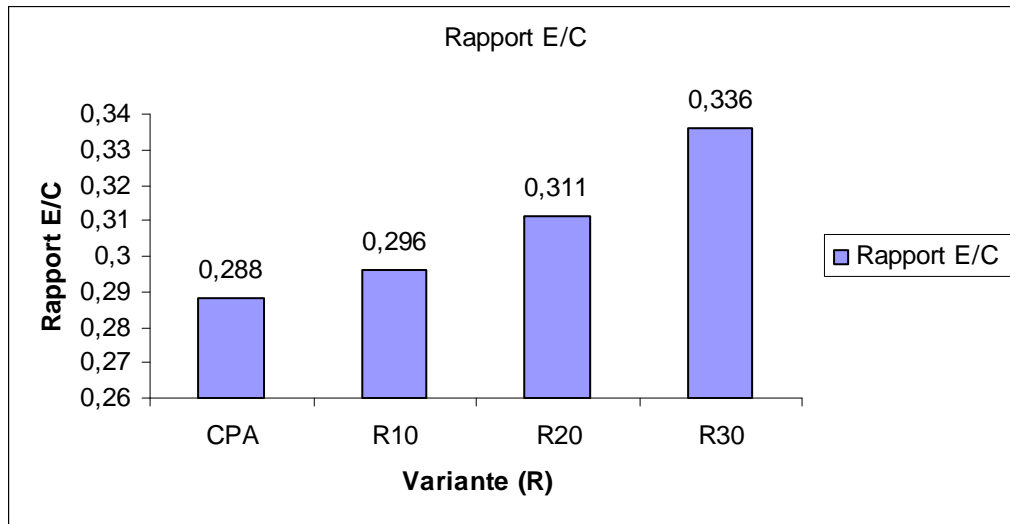


Figure 23 : Le rapport E/C pour avoir une consistance normale de 6 ± 1 mm.

II-2-3- La prise :

La figure 20 montre l'augmentation du temps de prise (début et fin) des variantes par rapport au ciment portland, mais aussi une diminution de ce temps avec l'augmentation du pourcentage d'ajout, cette observation est valable pour le début et fin de prise. Cela est dû au remplacement du clinker par les ajouts.

L'argile est une matière colloïdale, une fois que l'eau de la "solution" entre en réaction elle forme une sorte de gelée. L'argile sous forme colloïdale, donc gélatineuse, rend l'éprouvette imperméable, collante et difficile à travailler. Dans le ciment portland la prise est due aux réactions déjà mentionnées, mais dans les cas des variantes c'est l'ajout qui prend le dessus.

II-2-4- L'expansion :

On remarque que l'expansion à chaud est régulière et elle est en dessous de 2 mm, elle est de l'ordre de 1 mm pour les variantes (R) et de 0 mm pour les variantes (V), ce qui veut dire que la quantité de chaux libre est inférieure à 2%.

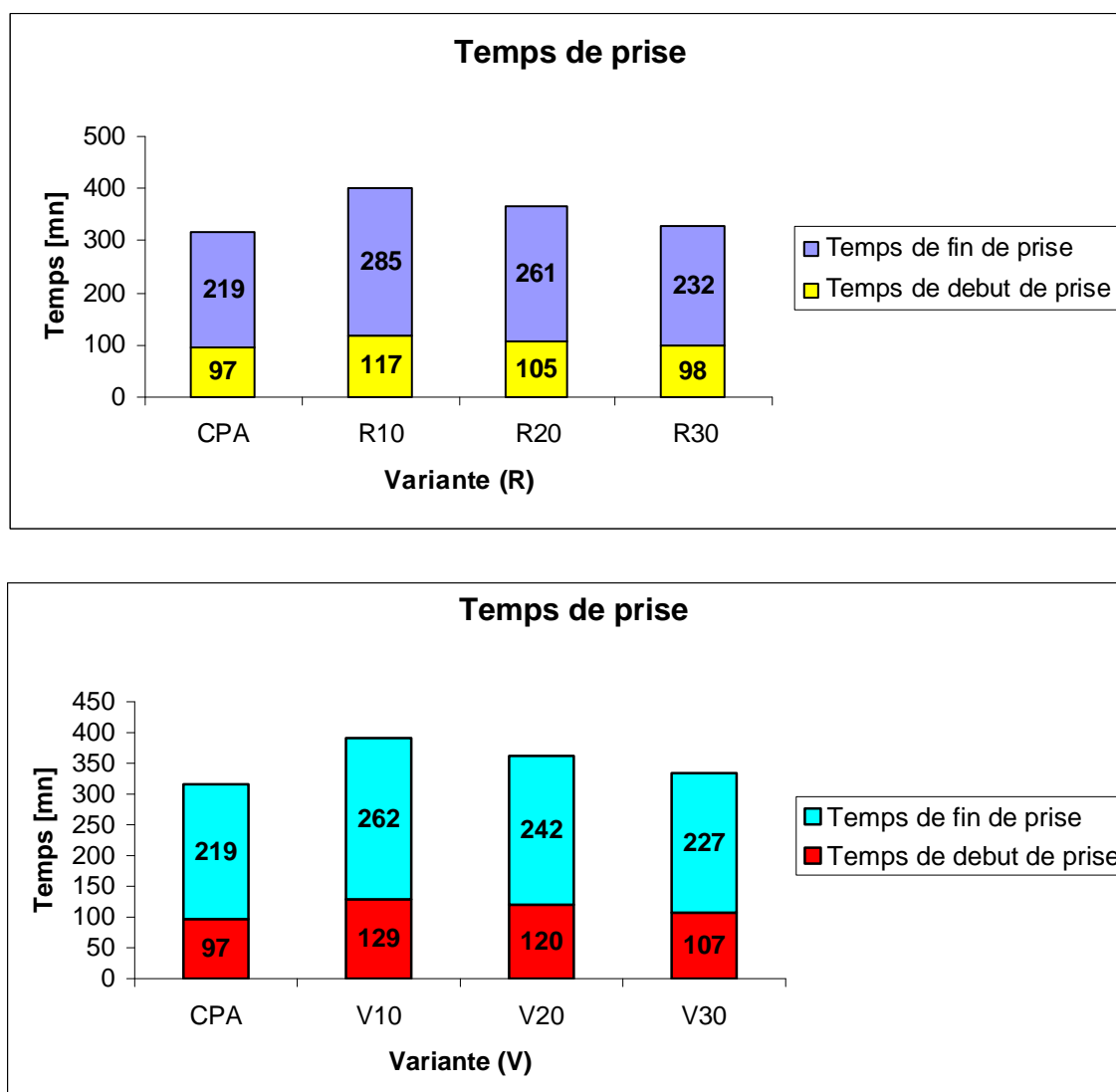


Figure 24 : Illustration du temps de prise

II-2-5- Résistance mécanique des mortiers :

Le mortier à été confectionné au sein des laboratoires de l'usine de Sor El-Ghozlane avec une eau de robinet et du sable normalisé conforme a la norme 196-1, plus les variantes décrites plus haut.

Dans les figures 21, 22, 23, 24, on constate deux périodes. La résistance élevée des variantes par rapport au ciment portland dans les premiers jours, qui s'explique par la finesse de la mouture des variantes qui est augmenté de 1000 [cm²/g], ce qui augmente l'activité chimique d'environ 20 à 25%. La substitution du clinker par les ajouts fait amoindrir les résistances à partir du 7^{ème} jours, car ces ajouts en un effet de remplissage, et libèrent l'eau, mais les forts pourcentages en silice qui sont en constantes augmentation pour chaque variantes retiennent l'eau dans leurs pores, ce qui limite les réactions entre l'eau et les différents minéraux.

Autre observation, la résistance en traction qui est en constante amélioration du 1^{er} au 90^{ème} jours des essais, allant jusqu'à 8.2 MPa pour R10, lors où le ciment portland est à 7.94 MPa au 90^{ème} jours, ceci est du principalement à la finesse élevée des variantes par rapport au ciment portland.

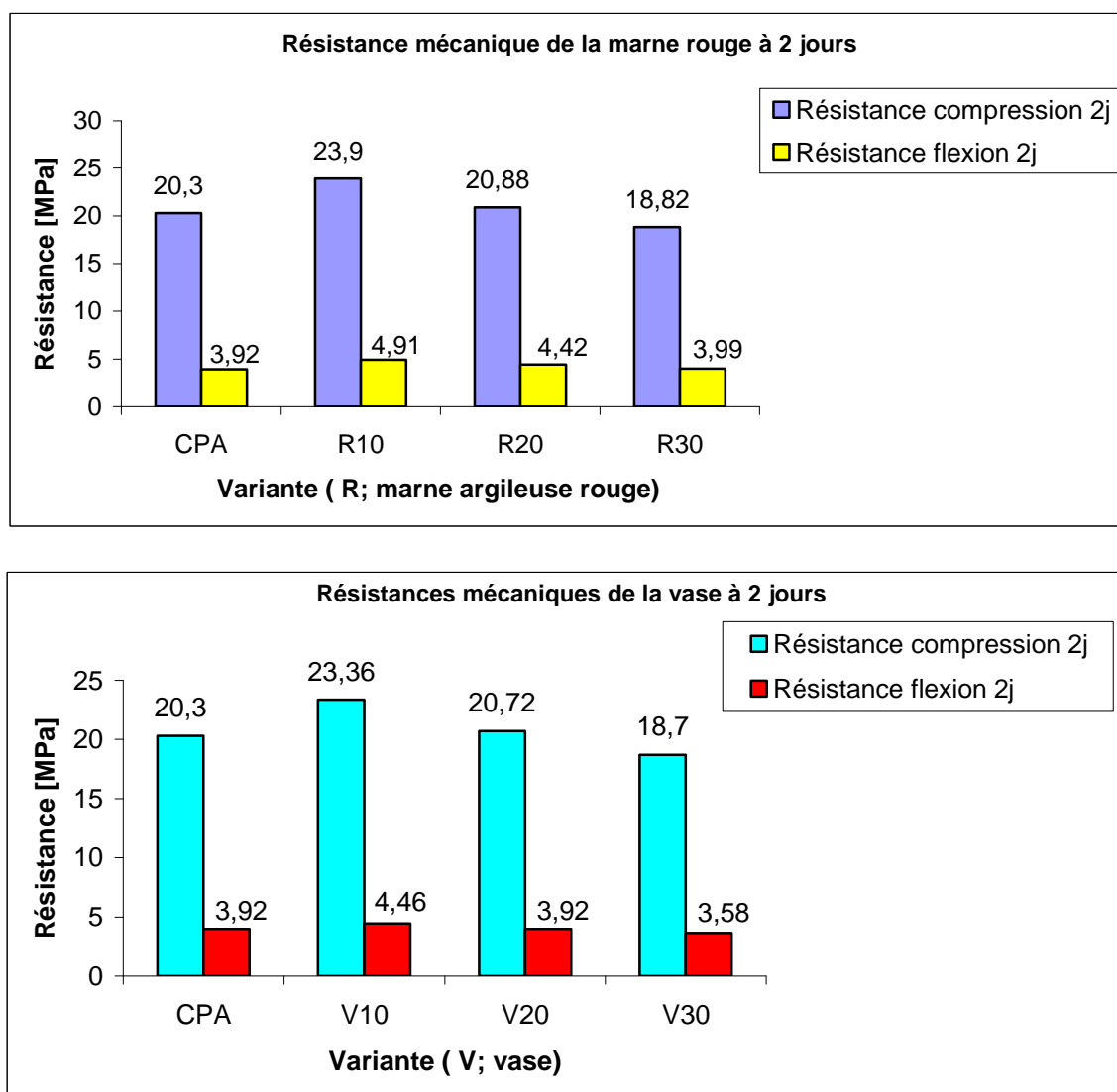


Figure 25 : Les résistances mécaniques des mortiers à 2 jours

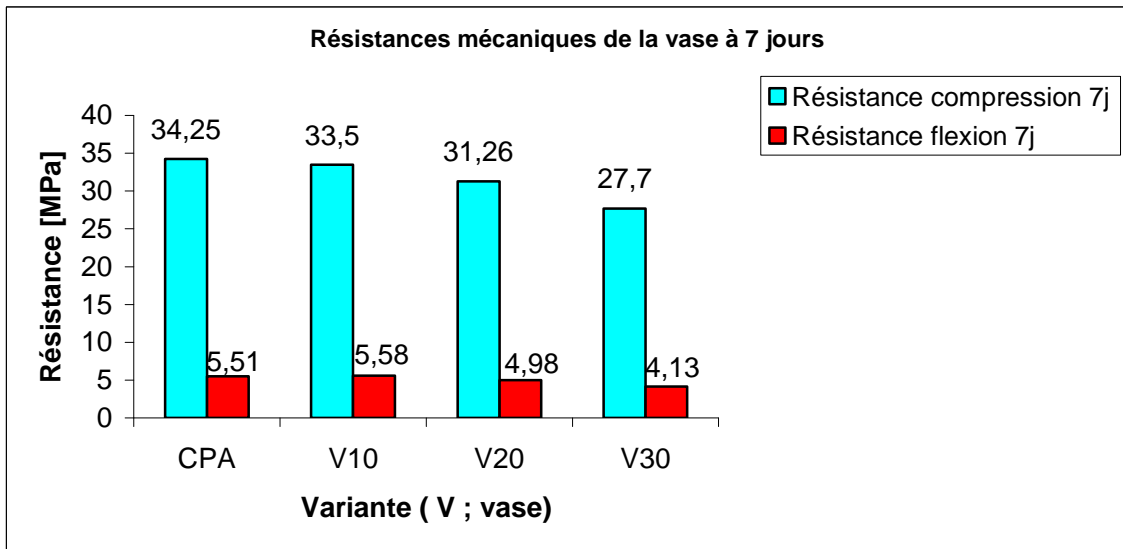
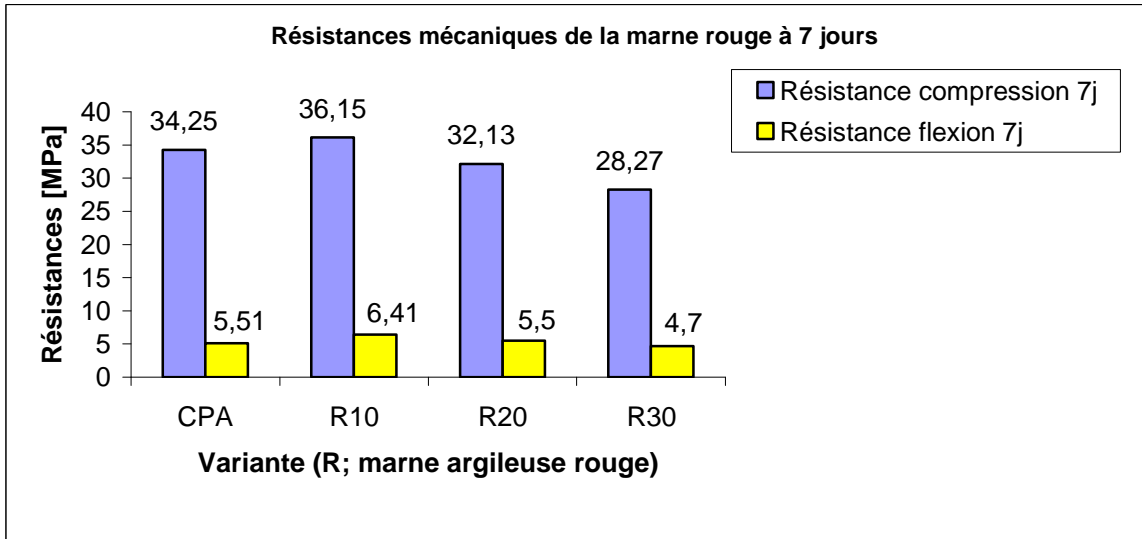


Figure 26 : Les résistances mécaniques des mortiers à 7 jours

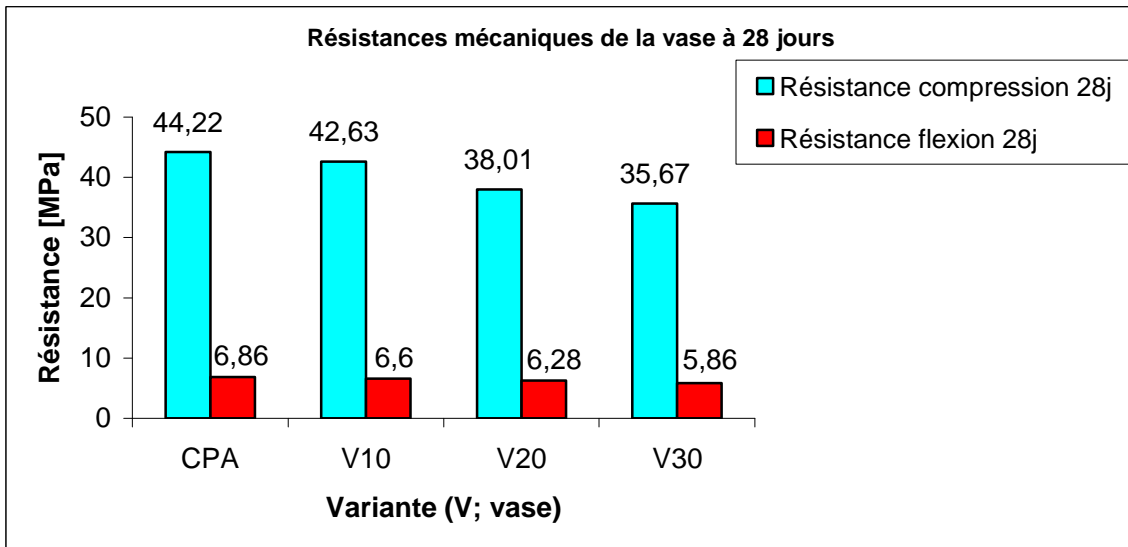
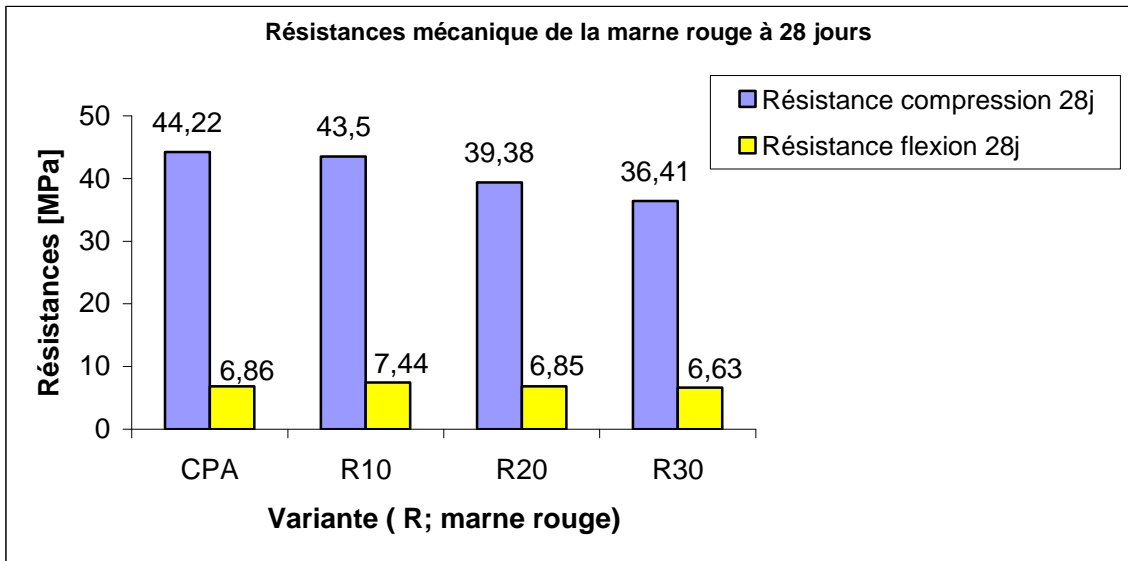


Figure 27 : Les résistances mécaniques des mortiers à 28 jours

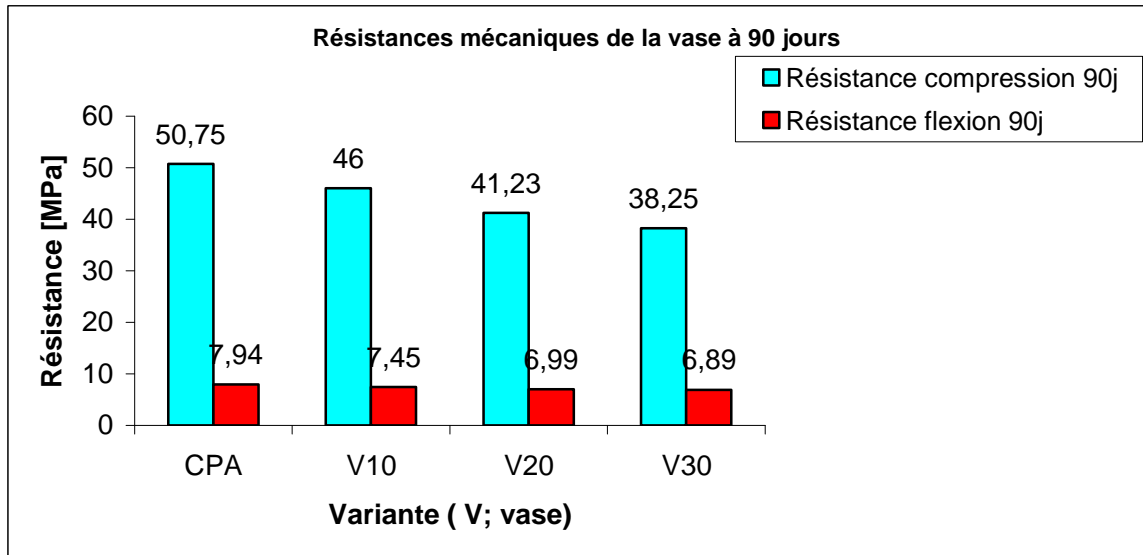
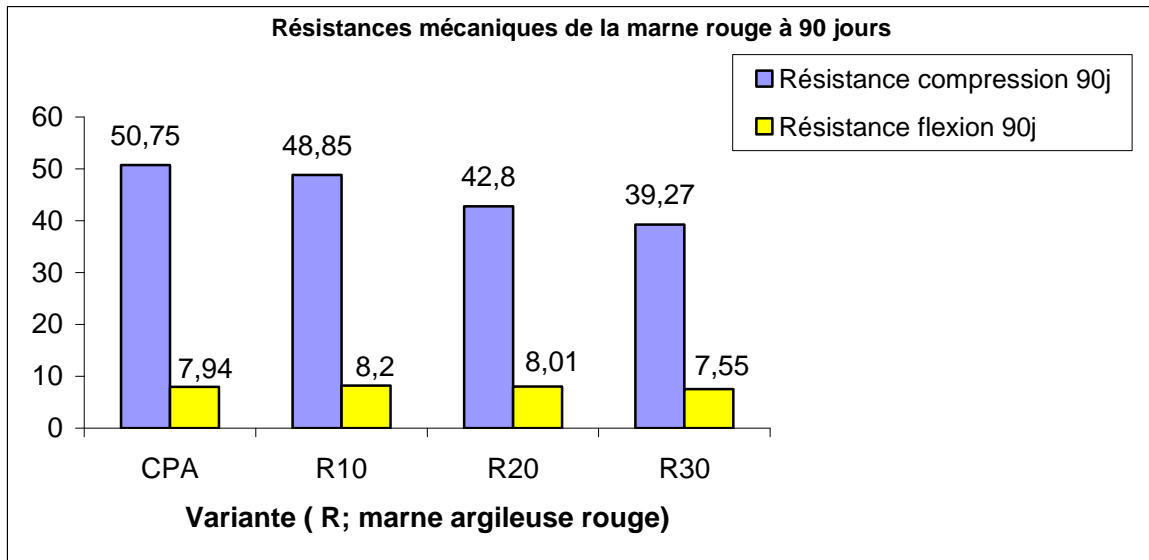


Figure 28 : Les résistances mécaniques des mortiers à 90 jours

III- Analyse des propriétés mécaniques du béton :

III-1- Caractéristiques des matériaux utilisés :

III-1-1- Le sable :

Pour la confection du béton, et toujours dans la perspective d'utilisée des matériaux locaux, on a utilisé un sable qui provient des abords de oued Maïter, qui se situe vers la route à Boussaâda.

L'avancée du désert a permis un dépôt important d'un sable fin, et par l'intermédiaire du vent qui s'infiltré par l'issue sud, il a permis son transport et son étalement dans de large surface. Ce sable dit « sable de dune », et d'origine éolienne ainsi des couches de sable fin mélangé bien sur aux galets de l'oued se sont formées.

Plusieurs entreprises exploitent des carrières le long de l'oued avec divers moyens mécaniques, le sable est livré aux différents chantiers de toute la région et ses environs.

Le sable de dune a été soumis à plusieurs essais au laboratoire de l'université de M'sila, suivant les normes AFNOR. Les résultats sont exposés ci-dessous :

- Masse volumique à l'état lâche : 1.63 Kg/L
- Masse volumique à l'état compact : 1.85 Kg/L
- Masse spécifique : 2.54 g/cm³
- Porosité à l'état lâche : 35.81
- Porosité à l'état compact : 27.17
- Compacité à l'état lâche : 64.18
- Compacité à l'état compact : 72.82
- Indices des vides à l'état lâche : 0.557
- Indices des vides à l'état compact : 0.373
- Equivalent de sable a vue ESV : 85.2
- Equivalent de sable a piston ESP : 80.7
- Analyse granulométrique :

La composition du sable a été déterminée par tamisage, les résultats sont rassemblés dans le tableau 14 si dessous :

Tamis [mm]	Refus partiels [g]	Refus cumulés		Tamisats (%)
		[g]	(%)	
5	0	0	0	100
2.5	60	60	6	94
1.25	33	93	9.3	90.7
0.63	28	121	12.1	87.9
0.315	225	346	34.6	65.4
0.125	615	961	96.1	3.9
0.08	35	996	99.6	0.4
Fond	3	999	99.9	0.1

Tableau 14- Analyse granulométrique du sable.

Remarques :

- Un équivalent de sable élevé se qui indique que c'est un sable très propre avec une absence presque totale de fines argileuses.
- Ce manque de fines il faudra le rattraper par une augmentation du dosage en eau.
- Une porosité importante de 30-40%, ce qui veut dire une absorption de 300 à 400 litres d'eau par m³ ce qui va entraîné un surdosage en ciment.
- Presque 70% des grains de sable ont un diamètre compris entre (0.315-0.125 mm) ce qui confirme que c'est un sable fin.

III-1-2-Le gravier :

Les granulats utilisés avec deux fractions, sont obtenus par concassage d'une roche calcaire compacte d'une résistance à la compression de 95 MPa. Ces fractions sont apportées d'une carrière située dans la région de El-Euch à 25 Km de M'sila en allant vers Bordj-Bou-Arreidj (carrière COSIDER).

Leurs caractéristiques sont montrées au tableau 15:

Caractéristique	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Masse volumique absolue	2.6	2.57
Masse volumique apparente	1.35	1.27
Porosité	48.18	50.23
Compacité	51.83	49.77
Indices des vides	0.929	1.009

Tableau 15 - Différentes caractéristiques des granulats utilisés.

-Un coefficient Los Angeles de 22% ce qui veut dire que notre gravier est utilisable pour la constitution des bétons.

- L'analyse granulométrique des deux fractions est donnée dans le tableau 16 et 17 suivants :

Tamis [mm]	Refus partiels [g]	Refus cumulés		Tamisats (%)
		[g]	(%)	
10	0	0	0	100
8	1	1	0.05	99.95
6.3	255.2	256.2	12.81	87.19
5	361.5	617.7	30.88	69.11
3.15	889	1506.7	75.33	24.66
2.5	271.3	1778	88.9	11.1
Fond	221.5	1999.5	99.98	0.02

Tableau 16 – Analyse granulométrique des granulats de fraction 3/8

Tamis [mm]	Refus partiels [g]	Refus cumulés		Tamisats (%)
		[g]	(%)	
20	0	0	0	100
16	0.024	24	0.8	99.2
12.5	990	1014	33.8	66.2
10	809	1823	60.76	39.24
8	615	2438	81.26	18.74
6.3	500	2938	97.93	2.07
5	62	3000	100	0
Fond	0	3000	100	0

Tableau 17 – Analyse granulométrique des granulats de fraction 8/16

III-2-Composition :

On suivant les instructions de la méthode de Dreux-Gorisse nous avons pu établir une première approche d'un béton avec un affaissement entre 6 à 9 cm. Les différentes compositions sont exposées dans le tableau 18 ci-dessous :

Variantes	Eau [L]	Ciment [Kg]	Gravier 3/8 [Kg]	Gravier 8/15 [Kg]	Sable [Kg]
CPA	179.37	400	181.80	1036.23	576.85
R10	185.00	400	180.87	1017.55	573.77
R20	193.33	400	178.46	1017.22	566.00
R30	195.00	400	176.56	1006.43	559.70
V10	190.00	400	179.82	1024.96	570.36
V20	196.67	400	176.87	1008.16	560.75
V30	209.17	400	174.46	994.40	552.85

Tableau 18- Composition du béton selon la méthode Dreux-Gorisse

III-3-Résistance mécanique du béton :

Après 28 jours de remarque, les résistances mécaniques du béton viennent confirmées ceux observer pour le mortier. Avec l'addition d'un fluidifiant (l'abaque de Dreux-Gorisse l'exige), les résistances en compression des bétons à base de 10% d'ajout aux premiers jours sont supérieure à celui d'un ciment portland (figure 25), à cause de la finesse des ciments qui est augmentée de 1000 cm²/g, car les ajouts sont finement broyés, ils libèrent l'eau emprisonnées, et remplissent les pores au sein du béton. Au delà du 7^{ème} jours les résistances sont en baissent (figure 27,29) à cause de la substitution d'une partie de clinker par l'ajout, ce qui limite à très peu les réactions d'hydratation pour le durcissement final.

III-4-Modules de déformation :

Le module de déformation instantanée est déduit à partir de la formule :

$$E_{ij} = 11000.(R_{cj})^{1/3} \text{ [MPa]}$$

E_{ij} : module de déformation instantanée en MPa à l'âge j.

R_{cj} : résistance à la compression en MPa à l'âge j.

D'après les résultats obtenus (figure 26,28,30), on remarque que le module varie de la même manière que la résistance à la compression, mais il est plus lent à ce développer, car ce dernier représente une caractéristique stable, qui ne varie que sensiblement, même dans le cas d'une augmentation considérables.

Le module de déformation longitudinale différée est donné par la formule :

$$E_{vj} = 3700.(R_{cj})^{1/3} \text{ [MPa]}$$

D'après les résultats ce module avoisine 3×10^{-4} [MPa], ce qui est en coordination avec le règlement, qui situ M'sila dans un climat tempéré sec ou zone B de la carte de zonage climatique de l'Algérie.

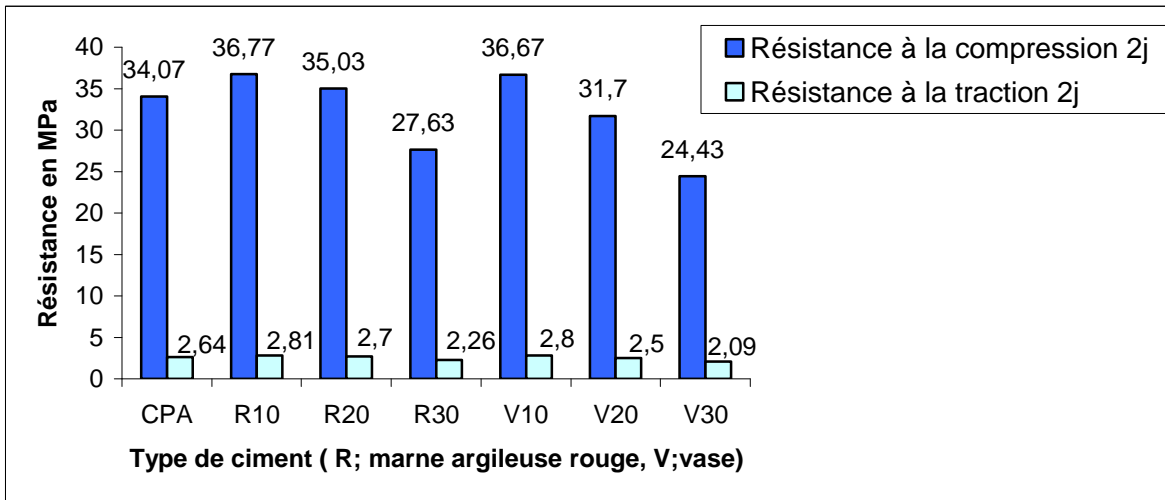


Figure 29 : Les résistances mécaniques des bétons à 2 jours

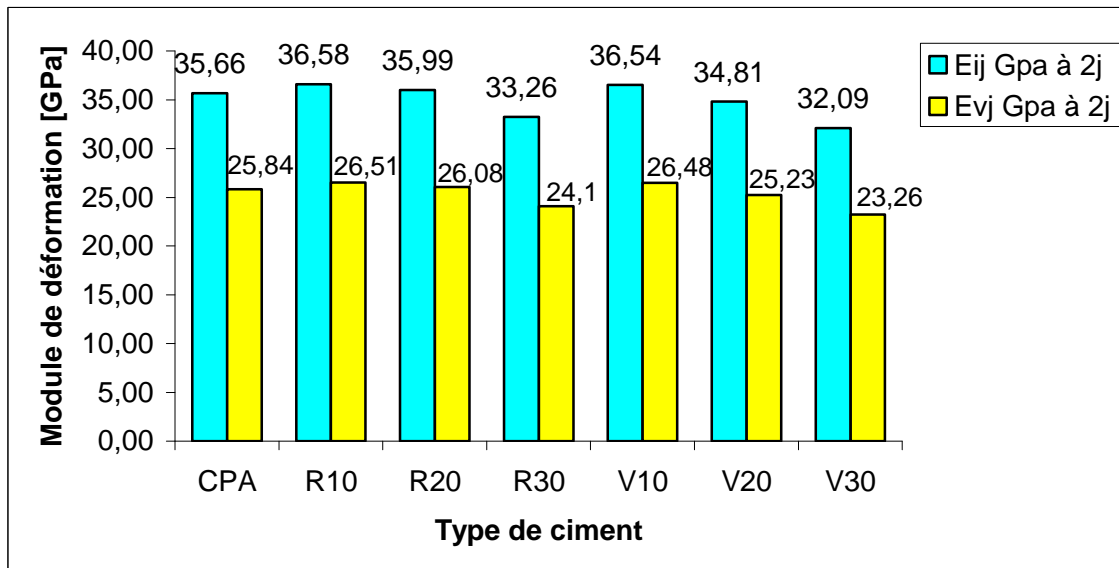


Figure 30 : Les déformations des bétons à 2 jours

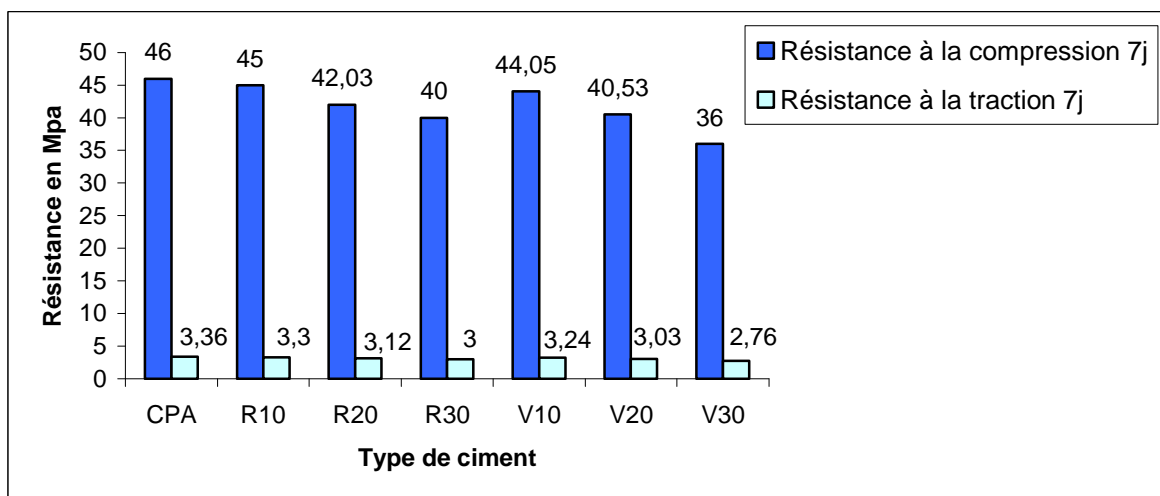


Figure 31 : Les résistances mécaniques des bétons à 7 jours

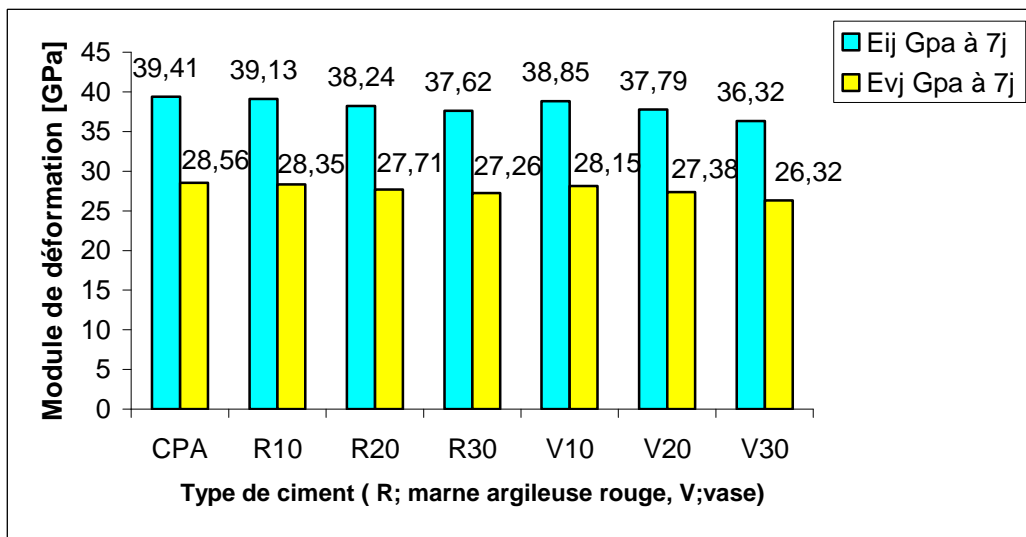


Figure 32 : Les déformation des bétons à 7 jours.

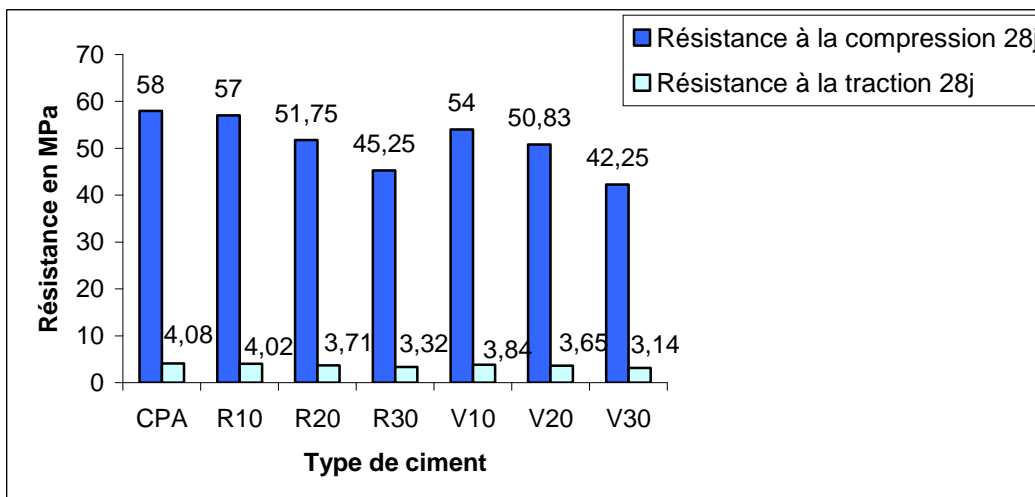


Figure 33 : Les résistances mécaniques des bétons à 28 jours

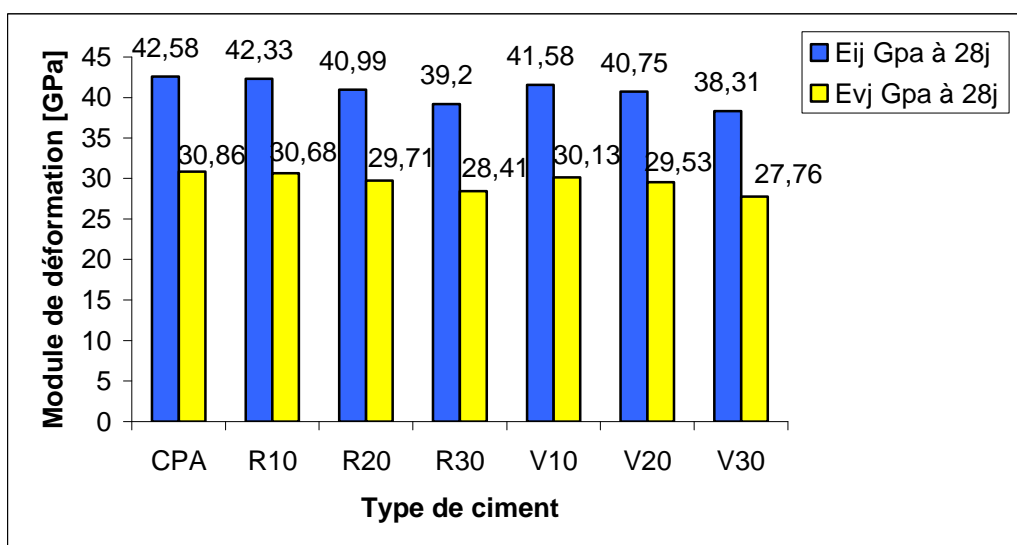


Figure 34 : Les déformation des bétons à 28 jours.

	CPA	R10	R20	R30	V10	V20	V30
Finesse de mouture							
pesée [g]	2,92083	2,91164	2,88409	2,82898	2,89327	2,8197	2,79224
K _s	460,68	462,13	466,55	475,64	465,07	477,19	481,89
Temps [s]	60	87	95	90	92	83	95
SSB [cm ² /g]	3568,41	4310,46	4547,37	4512,32	4460,79	4347,41	4696,88
Masse volumique absolue							
Volume de benzène [ml]	20,1	20,2	20,4	20,8	20,3	20,8	21,0
Masse volumique absolue	3,18	3,17	3,14	3,08	3,15	3,07	3,04
Consistance normale							
Volume d'eau [ml]	144	148	155,5	168	154	166	174
E/C	0,288	0,296	0,311	0,336	0,308	0,332	0,348
Consistance [mm]	5	6	5	5	6	5	5
Temps de prise							
Début de prise [mn]	97	117	105	98	129	120	107
Fin de prise [mn]	219	285	261	232	262	242	227
Expansion							
Avant (A) [mm]	12	5	10	12	8	9	10
Après (C) [mm]	13	6	11	13	8	9	10
Expansion [mm]	1	1	1	1	0	0	0
Résistances mécaniques des mortiers à 2 jours							
R compression [MPa]	20,3	23,9	20,88	18,82	23,36	20,72	18,7
R traction [MPa]	3,92	4,91	4,42	3,99	4,46	3,92	3,58
Résistances mécaniques des mortiers à 7 jours							
R compression [MPa]	34,25	36,15	32,13	28,27	33,5	31,26	27,7
R traction [MPa]	5,1	6,41	5,5	4,7	5,58	4,98	4,13
Résistances mécaniques des mortiers à 28 jours							
R compression [MPa]	44,22	43,5	39,38	36,41	42,63	38,01	35,67
R traction [MPa]	6,86	7,44	6,85	6,63	6,6	6,28	5,86
Résistances mécaniques des mortiers à 90 jours							
R compression [MPa]	50,75	48,85	42,8	39,27	46	41,23	38,25
R traction [MPa]	7,94	8,2	8,01	7,55	7,45	6,99	6,89
Résistances mécaniques des bétons à 2 jours							
R compression [MPa]	34,07	36,77	35,03	27,63	36,67	31,7	24,43
R traction [MPa]	2,64	2,81	2,7	2,26	2,8	2,5	2,09
Résistances mécaniques des bétons à 7 jours							
R compression [MPa]	46	45	42,03	40	44,05	40,53	36
R traction [MPa]	3,36	3,3	3,12	3	3,24	3,03	2,76
Résistances mécaniques des bétons à 28 jours							
R compression [MPa]	58	57	51,75	45,25	54	50,83	42,25
R traction [MPa]	4,08	4,02	3,71	3,32	3,84	3,65	3,14
Les modules de déformations à 2 jours							
Eij [GPa]	35,66	36,58	35,99	33,26	36,54	34,81	32,09
Evj [GPa]	25,84	26,51	26,08	24,1	26,48	25,23	23,26
Les modules de déformations à 7 jours							
Eij [GPa]	39,41	39,13	38,24	37,62	38,85	37,79	36,32
Evj [GPa]	28,56	28,35	27,71	27,26	28,15	27,38	26,32
Les modules de déformations à 28 jours							
Eij [GPa]	42,58	42,33	40,99	39,2	41,58	40,75	38,31
Evj [GPa]	30,86	30,68	29,71	28,41	30,13	29,53	27,76

Conclusion

Les objectifs fixés par l'état algérienne dans le domaine du bâtiment et travaux publics, notamment dans les dernières années, demande dans les brefs délais des investissements considérables. Les usines de ciment tournent à plein régime, pour produire suffisamment de cette matière, qui engloutit à son tour des millions de tonnes de sol, ce qui impose une stratégie raisonnable pour diminuer au maximum l'atteinte au écosystème.

L'avancé technologique ouvre chaque jours les portes des matériaux inexplorés, dans les cinquante années précédentes nous ignorions beaucoup de secrets sur les argiles, mais avec l'analyse infrarouge et la résonance magnétique, ces secrets sont dans la plupart élucidés, et elles sont devenues facile à manipulées.

Le secteur de production du ciment le plus absorbeur d'argiles ne cessent d'engloutir de nouveaux hectares, en parallèle des résidus dangereux et encombrants sont en constante augmentation de volume, qui parmi eux, la boue d'opération de dragage des barrages appeler «la vase». En plus notre région englobe de vaste plateau de sol rouge, qui après des analyses chimiques et minéralogiques effectuées ont révélées des minéraux, comme l'illite ou la kaolinite, et de l'alumine et l'oxyde de calcium en proportions satisfaisantes, ce qui offre des possibilités concrètes de leur utilisation comme substituant du clinker en vue d'obtention de nouveau ciment.

Parmi les techniques, qui intéressent notre domaine, l'essai d'analyse thermique différentielle, donne une indication sur le degré de calcination des argiles, comme par exemple le cas de la vase qui à un degré de calcination de 750°C, et ce degré est de l'ordre de 780°C pour la marne argileuse rouge. Cette calcination lente effectuer dans un four fixe pendent 5 heures, à en première observation changer la couleur de nos matériaux, ce qui signifie un changement d'états de constitution car l'évaporation d'eau et le changement de certains minéraux, n'est pas passer sont détériorer les mailles des ces minéraux.

Avec leur incorporation à coté du clinker afin de produire des ciments, on a obtenus des résultats satisfaisants, qui peuvent être améliorés au fur et à mesure du progrès technologique dans ce domaine. Après avoir réaliser certains essais typiques d'une caractérisation des ciments, on à constater les points suivants :

- Les nouveaux ciments élaborés répandent aux exigences des normes EN 197-1 et 197-2, telle que le niveaux de magnésium et de sulfate.
- La faible teneur en alcalis permet d'utiliser ces ciments en combinaison avec tous les granulats traditionnels sans risque de réaction entre les alcalis du ciment et les granulats.
- La diminution de la masse volumique à chaque augmentation du pourcentage d'argile calcinée, est normale vu l'augmentation des éléments expansifs.
- L'augmentation de la finesse a jouée un rôle déterminant dans l'augmentation de la réponse mécanique aux premiers âges.
- A chaque augmentation d'ajouts la consistance augmente, car l'eau destinée à l'hydratation des minéraux du clinker est absorbée par l'ajout, et la consistance la plus proche du ciment portland (Sour El-Ghozlane), est obtenue avec l'incorporation de 10% d'ajouts.

- La longue durée de temps de prise n'a pas de conséquence sur les résistances, car même avec un temps de prise élevé les ciments à 10% d'ajouts en donnés les meilleurs résultats.
- L'incorporation de 10% d'argile calcinée donne des réponses mécaniques assez proche d'un ciment portland (Sour El-Ghozlane), qui est de l'ordre de 42-43 MPa, pour les ciments composés, et de 44 MPa pour le ciment portland.
- A raison d'un rapport E/C plutôt faible voisinant 0.45, plus l'exigence des abaques de la méthode Dreux-Gorisse, un ajout d'un fluidifiant, pour arriver à une bonne ouvrabilité, la résistance à la compression du béton est conséquente.

Avec ses remarques, on peut dire que ces ciments peuvent être utilisés dans des structures à sollicitations modérées. Mais cette étude peut être améliorée par plus d'essai sur les ajouts expérimentés, comme par exemple une spectrométrie infra-rouge, pour connaître les groupes hydroxyles et les liaisons entre atomes, ou l'analyse thermogravimétrique pour déterminer la perte en masse, mais surtout l'évaluation de l'activité pouzzolanique, pour déterminer la quantité d'hydroxyde de calcium consommée au cours du temps, en changeant la température de calcination, car l'argile reste toujours un domaine très vaste.

Bibliographie

- [1]- J. BROCARD, « Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment », Tome I, Librairie Aristide Quillet, 1972, P 813,815.
- [2]- J. BARON, J.P. OLLIVIER et J.C. WEISS, « Les bétons, bases et données pour leur formulation », Edition Eyrolles, Troisième tirage, 1999, P 3-12.
- [3]- Société des ciments de Ain-El-Kebira, « Chimie des ciments 2 », 2004, P 5, 11, 46-47.
- [4]- R. DUPAIN, « Granulats, sols, ciments et bétons », 2^{ème} édition, Janvier 2000, Edition Casteilla, P 80-81.
- [5]- G. DREUX, « Nouveau guide du béton », Edition Eyrolles ,2^{ème} edition, 1979, P 17.
- [6]- C. KIRPACH, Ciments Luxembourgeois, Séminaire- Béton2001: Journée d'information technique, 23 novembre 2001, P 7-21.
- [7]- M.BELOUADAH, « Evaluation des effets secondaires liés à l'incorporation des adjuvants sur les propriétés de durabilité du béton à base de matériaux locaux », Thèse de magister, M'sila, 2004, P 84,98.
- [8]- A. KOMAR, « Matériaux et éléments de construction », Editions Mir, 1989, P 146-148.
- [9]- J.P. GAGNON, « Influence d'un superplastifiant sur l'énergie d'activation lors de l'hydratation d'un coulis de ciment », Département de chimie, mémoire de maîtrise en sciences appliquée, université de Sherbrooke, mai 1996, P 9-12.
- [10]- M.THIERY, G.PLATRET, E.MASSIEU, G.VILLAIN, V.BAROGHEL-BOUNY, « Un modèle pour le calcul de la teneur en portlandite des matériaux cimentaires comme donnée d'entrée des modèles de carbonatation », Journées Ouvrages d'Art du réseau des L.P.C, Lyon, 2005, P 7-9.
- [11]-C.NACHTERGAL, « Agenda du bâtiment », Edition DE Boeck Université, 26^{ème} édition, 2^{ème} tirage, 1994, P 7-8.
- [12]-Alain LAURENT, « Développement de nouveaux adjuvants destinés à la fabrication du ciment (agents de mouture) et à l'amélioration des propriétés rhéologiques du béton », Mémoire de maîtrise des sciences appliquées, Spécialité : génie civil, Université de Sherbrooke, Mai 1997, P 3-17.
- [13]- P.Mounanga, A.Khelidj, A.Loukili, G.Bastian, « Etude expérimentale du comportement thermique et du retrait endogène de pâtes de ciment au très jeune âge », 22^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2004, P1-8
- [14]- N.BURLION, I.YURTDAS, F.SKOCZYLAS, « Comportement mécanique et séchage de matériaux à matrice cimentaire (comparaison mortier/béton) », Revue française de génie civil, édition Lavoisier, volume 7, N°2, 2003, P 146-148.

- [15]-G.LUCAS, P.CROS, J.LANG, « Les roches sédimentaires, étude microscopique des roches meubles et consolidées », Tome 2, édition DOIN, 1976, P 38.
- [16]-N.S.SORO, « Influence des ions fer sur les transformations thermiques de la kaolinite », thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité sciences des matériaux céramiques et traitements de surfaces, université de Limoges, 2003, P 16-19, 34.
- [17]-G.MILLOT, « Argiles et minéraux argileux », Dictionnaire des roches et minéraux, pétrologie et minéralogie, édition Encyclopaedia Universalis et Albin Michel, 2001, P 59-65.
- [18]-D.CHAHIDI ELOUAZZANI, « Caractérisation physico-chimique et valorisation en bâtiment et travaux publics des cendres issues de l'incinération des boues de papeterie », thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité sciences et techniques du déchet, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005, P 18-21,65.
- [19]-K.SOBOLEV, T.R.NAIK, « Performance as a factor for sustainability of the cement industry », Report N°. CBU-2005-17, Rep-588, August 2005, Presented and published at the CANMET/ACI, Three-day International Symposium on sustainable development of cement and concrete, October 5-7, 2005, Toronto, Canada, P 6-7.
- [20]-U.CHINJE MELO, N.BILLONG, «Activité pouzzolanique des déchets de briques et tuiles cuites», African Journal of Science and Technology (AJST), Science and engineering Series Vol. 5, N°1, June 2004, P 92-100.
- [21]- C.BICH, « Contribution à l'étude de l'activité thermique du kaolin :évolution de la structure cristallographique et activité pouzzolanique », thèse pour l'obtention d'un grade de docteur, spécialité génie civil, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2005, P 44-45.
- [22]- J.PIMIENTA, J.ROUSSEAU, G.MONEK, « Reconnaissance géologique du chantier de construction », éditions EYROLLES, 1973, P165.
- [23]-C.HUANG, J.R.PAN, K-D.SUN, C-T.LIAW, « Reuse of water treatment plant sludge and dam sediment in brick-making», Water Science and Technology, Vol.44, N°10, IWA Publishing 2001, P273-277.
- [24]-A.BENAMAR, A.ALEM, « Approche de valorisation des sédiments de dragage »,21^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2003, P1-8.
- [25]-J.FABRE, « Introduction a la géologie du Sahara Algérien »,édition Société Nationale d'Édition et de Diffusion, 1976, P11-14, 307, 319
- [26]-L.BERTHOIS, « Les roches sédimentaires, étude sédimentologique des roches meubles »,Tome 1, édition DOIN, 1974, P 202.
- [27]-R.BOURGEOIS, H.CHAUVEL, J.KESSLER, « Mémotech, génie des matériaux », Editions CASTEILLA, 2001, P78-79.
- [28]-P.LE PARLOUËR, B.LEGENDRE, « Matériaux de référence pour les techniques d'analyse thermique et de calorimétrie et méthodes de mesures calorimétriques », Revue Française de métrologie, N°1 , Volume 2005-1, P 19-26.

[29]- MIHOUBI DAOUED, « Déshydratation d'argiles par compression et séchage. Aspect de modélisation et de simulation », Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur, spécialité énergétique, transfert et systèmes dispersés, Université de Pau, 2004, P 24, 30, 162.

[30]- M. NAKAHIRA , T. KATO, « Thermal transformations of pyrophyllite and talc as revealed by X-ray and electron diffraction studies», 12th national conference, journals “clay and clay minerals”, Vol.12, Issue 1, 1963, P 21-27.

[31]- J. J. FRIPIAT, « surface properties of alumino-silicates», 12th national conference, journals “clay and clay minerals”, Vol.12, Issue 1,1963, P 327-358.