

République algérienne démocratique et populaire

Centre universitaire Belhadj Bouchaib

Faculté des sciences chimie



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention de diplôme

Master en chimie de polymère

Thème :

Influence de pourcentage
de clinker incuit
sur la qualité de ciment (CPJ)

Réalisé par :

-M^r. Sidi yakoub Abdelwahab

-M^r. Dahmani Miloud

M^r. Boussalem IsmailPrésident du jury

M^{me}. Berrichi AminaExamiretrise

M^{me}. Azzi HadjerExamiretrise

M^{me}. Ramdani NassimaEncadreur

Mme. Gharmaoui Nadjet.....Co-Encadreur

Année universitaire :2017/2018



REMERCIEMENTS

Mr Boussalem Ismail notre encadreur

Vous nous avez toujours réservé un accueil amical et bienveillant.

Veillez toujours dans ce travail, que vous avez inspiré et guidé.

L'expression de notre admission et de notre profond attachement.

Me Gharmaoui Nadjat

Nous avons été très touchés par votre disponibilité et votre gentillesse, nous vous remercions pour vos conseils remarques constructives.

Mr Belarbi Lahcen Président du jury

Et les membres de jury:

Par l'intime dont vous nous avez gratifiés en acceptant de juger ce travail qu'il nous soit permis de vous exprimer nos remerciements et notre vive reconnaissance.

Les assistants de laboratoire de la cimenterie de Béni-Saf :

Nous voudrions vous exprimer votre profonde gratitude pour le soin et la diligence que vous avez apporté à notre travail.

A ceux qui ont participé à notre formation, pour les qualités et la générosité de leur enseignement, avec notre reconnaissance et notre profond attachement.

A ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation et l'élaboration de ce travail.

Nous tenons remercier l'ensemble de professeur du département de chimie

INTRODUCTION

INTRODUCTION

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. La gamme étendue de compositions de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très variés qui sont faits du béton sur chantier ou en usine.

Exigence climatique, résistance à des agents agressifs, autant de paramètres qui impliquent de choisir le ciment le plus approprié, il importe de connaître les caractéristiques spécifiques des différents types de ciments prévues par la normalisation.

Le but de notre étude est l'effet de différents dosages dans le ciment avec ajout fixe dans un mortier ayant des résistances satisfaisant à la norme pour ce faire, nous avons effectué les essais suivants.

- 1- Des analyses physico-chimiques des divers échantillons selon la norme NA442.
- 2- Des résistances à la traction par flexion et la compression à 2j, 7j, 28 jours sur le mortier à 5%, 10%, 15%, 20%, 25% de ciment.

CHAPITRE I: GÉNÉRALITÉ SUR LA FABRICATION DU CIMENT

1-Historique :

Dans la préhistoire et au début l'antiquité les maçonneries étaient soit liées à l'argile, soit réalisées sans liant, comme les murs pélagiques de Grèce ou les murs incas [1]. A Babylone, les maçonneries de briques étaient liées au bitume. Les Egyptiens utilisèrent pour les pyramides, notamment, un plâtre grossier produit par cuisson d'un gypse (sulfate de calcium) impur. L'es Grecs furent parmi les premiers constructeurs employant la chaux obtenue par cuisson du calcaire (carbonate de chaux). Les Romains se servirent beaucoup de la chaux dans leurs constructions, mais améliorèrent ce liant dès le 1^{er} siècle avant J.-C En l'additionnant de pouzzolane soit naturelle comme les cendre volcanique actives, soit artificielles comme les briques pilées, ils obtinrent ainsi un liant hydraulique, appelé ciment romain, qui est en fait intermédiaire entre une chaux et un véritable ciment. Celui-ci permet de construire de grands ouvrages hydrauliques, tel le pont du Gard, ou maritimes tels les ports. Aucun progrès ne fut accompli sur les liants pendant le moyen Age, dont les principales constructions-cathédrales-doivent leur réussite surtout aux progrès réalisés dans l'art de tailler et d'assembler les pierres. [2]

C'est seulement au XVIII Le siècle, les procédés de cuisson s'améliorent, que des chaux hydrauliques, intermédiaires entre les chaux et les ciments, furent produits, En 1756 l'Anglais Smeaton, [2]

En mélangeant celles-ci avec des pouzzolanes, obtient un mortier aussi dur que la pierre de portland, cette élaboration fut reprise par ses successeurs. Ainsi fut introduit progressivement dans le langage l'appellation de ciment portland, En 1817, le français louis Vicat, étudiant scientifiquement et non plus empiriquement, comme ses prédécesseurs, les chaux hydraulique, découvrit les principes chimiques des ciments et définit leurs règles de fabrication. Aussi en est-il considéré comme l'inventeur. [2]

En 1824, l'Anglais Aspdin prit un brevet pour la fabrication d'un ciment de portland mais celui-là comportait encore beaucoup de points obscurs, C'est seulement en 1845 que l'Anglais Johnson indiqua de façon précise les règles de fabrication de ce produit.

A la fin du XIXe siècle, en France, le Chatelier étudia la composition chimique des divers constituants des ciments ; son œuvre fut perfectionnée et achevée par l'américain Bague au XXe siècle.

En 1890 on comprit l'intérêt du laitier granulé ajouté au ciment, et après 1945, celui des cendres volantes. Les ciments spéciaux sont d'invention plus récente : le ciment alumineux fut découvert par Bied, en 1908.

2-Le ciment :

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise par suite des réactions et processus d'hydratation et qui après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. [4]

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LA FABRICATION DU CIMENT

Dans le langage courant, le terme de ciment peut être source de confusion lorsqu'il est utilisé pour désigner à la fois : **[3]**

- La poudre de ciment (par exemple telle qu'elle est commercialisée en sac).
- La pâte de ciment au moment de son gâchage à l'eau.
- Le produit obtenu après durcissement

Dans tout ce qui suit, on distinguera ces différents états en appelant : **[3]**

- Ciment anhydre : (sans eau) la poudre de ciment avant son gâchage à l'eau.
- Ciment hydraté : les composés, insolubles dans l'eau, obtenus par combinaison chimique de l'eau avec le grain de ciment anhydre.
- Pâte fraîche de ciment : le mélange d'eau et de ciment anhydre avant que l'hydratation n'ait conduit à en faire un solide appelé pâte de ciment durcie.

L'expression de "pâte de ciment durcissant" sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans sa transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

3-Constituants de base du ciment :

On peut théoriquement fabriquer du ciment portland à partir de matériaux quelconques renfermant chaux, silice, alumine et fer.

En pratique, les possibilités sont beaucoup plus limitées car on est obligé de choisir, pour des raisons évidentes, des matières premières faciles à extraire, traiter, et combiner.

On peut utiliser aussi comme appoint des sous produits d'autres industries tels le laitier de hauts fourneaux ou les cendres des centrales thermiques **[5]**.

3.1- Matières premières :

On classe habituellement les matières premières naturelles en :

- Calcaire : plus de 75% de CaCO_3 .
- Argile : moins de 25% de CaCO_3 .
- Eléments argilo- calcaires : de 40% à 80% de CaCO_3 . **[5]**

3.1.1- Calcaire :

Les calcaires peuvent être de pureté et de dureté variable, ils proviennent du dépôt de CaCO_3 contenu dans les eaux de mer ou des lacs, dépôts provoqués par précipitation chimique ou réalisé par l'intermédiaire d'organisme vivant (mollusques, algues).

Certains de ces dépôts soumis à une pression et à une température suffisante, ont donné des calcaires cristallins. **[5]**

Les principales impuretés rencontrées dans les calcaires sont :

➤ La silice

Elle se présente sous plusieurs formes :

- Libre : elle ne peut se combiner et doit être éliminée si elle apparaît en nodules de silex ou de quartz, il peut en être autrement si elle se trouve finement divisée à l'état naturel et répartie dans la masse de calcaire.
- Combinée : divers éléments tel que le fer, la magnésie, l'alumine, la silice et l'alumine déjà combinée sous forme d'argile réagissent bien avec la chaux. [5]

➤ La magnésie

La magnésie est un élément dangereux du fait de son expansion ultérieure possible au sein du ciment hydraté. Les calcaires ne doivent pas contenir plus de 5% de magnésie. [5]

➤ Le fer

Le fer rencontre le plus souvent sous forme d'oxyde Fe_2O_3 ou de pyrite Fe_2S (le maximum permis est de 2% dans ce dernier cas). Le fer joue un rôle utile de fondant. [5]

➤ Les alcalis

Tels que soude et potasse sont volatilisés au moment de la clinkérisation et se retrouvent surtout dans les poussières du four, lesquelles sont actuellement souvent recyclées. Les alcalis peuvent provoquer certaines difficultés au cours de la fabrication du ciment (formation d'anneaux dans le four, modification de certaines caractéristiques physique du ciment).

Les calcaires dits « purs » contiennent au moins 95% de $CaCO_3$ et les impuretés mentionnées ci-dessus jouent alors un rôle mineur. [5]

3.1.2-Argiles :

Les argiles sont constituées essentiellement de silice, d'alumine et de fer et constituent par là même le complément indispensable du calcaire. Elles peuvent être classées de plusieurs manières. On distingue ainsi :

- les argiles résiduelles provenant de la décomposition sur place de roches existantes, du fait d'agents physico-chimiques.

- les argiles transportées et déposées sous l'effet des mers, des cours d'eau, des glaciers, du vent.

Du point de vue physico-chimique on peut classer les argiles en différents groupes :

- groupe kaolin : formule générale : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- groupe halloysite : formule générale : $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.
- groupe montmorillonite : formule générale: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.
- groupe des minéraux argileux micacés : (ex : séricite).
- groupe des minéraux argileux magnésiens : (ex : sépiolite).

Les argiles utilisées en cimenterie sont des argiles communes qui peuvent être constituées par des mélanges des groupes énumérés. De plus les argiles résiduelles contiennent souvent des fragments des roches qui leur ont donné naissance et qui risquent de les rendre impropres à la fabrication du ciment (silex, quartz, sous forme de nodules, de sable,...etc.).

Là encore les impuretés telles que magnésie, soufre, soude, potasse, doivent être en quantité très limitée.

D'une manière générale, le coût de la préparation des matières premières croît avec le nombre de constituants à mélanger.

Il faut donc s'efforcer d'avoir un nombre de constituants aussi réduit que possible.

Ces constituants doivent être faciles à broyer, peu coûteux à sécher s'il s'agit de voies humides et faciles à combiner lors de la clinkérisation. [5]

3.1.3-Elément argileux calcaires :

Ils contiennent les éléments principaux nécessaires à la fabrication du ciment mais doivent être corrigés par des apports de calcaire ou d'argile afin de faire leur dosage.

Certains calcaires argileux renferment naturellement les divers constituants du ciment portland en proportion voulu. Ces « pierres à ciments » sont évidemment très rare. [5]

3.2-Matériaux de correction :

3.2.1-Minerais de fer (Fe_2O_3) : [6,7]

Le minerai de fer est une roche contenant du fer, généralement sous la forme d'oxydes, comme la bauxite.

Les minerais de fer ont une teneur en fer variable selon le minéral ferrifère, sachant également que l'isomorphisme, presque toujours présent dans les minéraux naturels, réduit la teneur théorique.

3.2.2-Le tuf : [6,7]

Le tuf est un type de roche à structure vacuolaire pouvant avoir deux origines :

- Le tuf volcanique, qui provient des téphras de petite taille emprisonnant parfois des fragments plus gros s'accumulent et sont consolidés par l'eau.
- Le tuf calcaire ou travertin, d'origine sédimentaire et qui provient des ions carbonate dissous dans l'eau qui a précipité en milieu continental (ruisseau, source riche en carbonate dissous,...etc.) en incluant souvent des traces de végétaux ou de coquilles.

3.2.3-Le gypse : [8]

Est une espèce minérale composée de sulfate dihydraté de calcium de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Le mot gypse désigne ainsi à la fois une espèce chimique et une roche.

Le gypse est le minerai qui permet de fabriquer le plâtre. Il entre aussi dans la composition des ciments.

La mine de Naica permet de voir des cristaux géants de ce minéral dépassant 11 mètres de long.

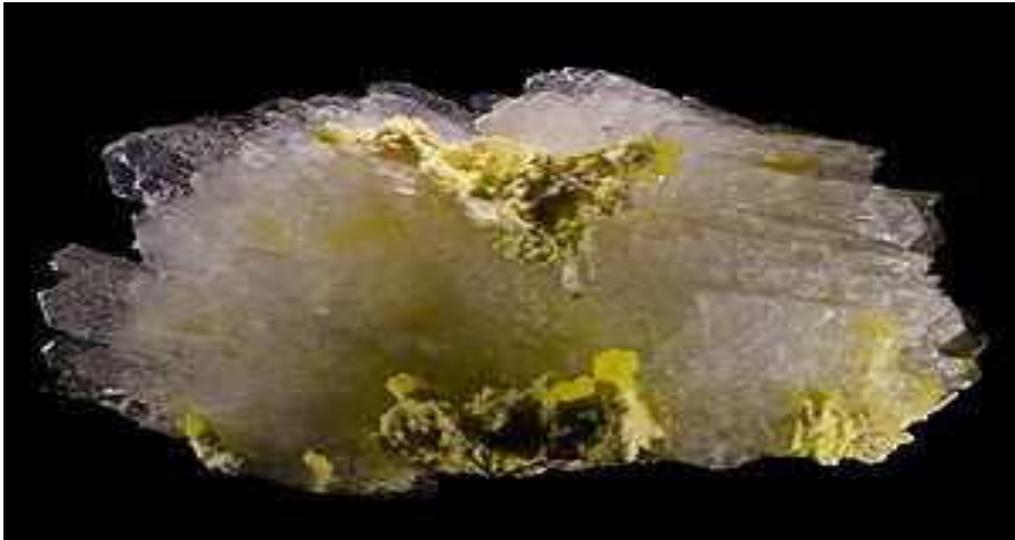


Figure I.1 : Grain de gypse [8].

3.2.4-La bauxite : [10]

Est une roche latéritique blanche, rouge ou grise, caractérisée par sa forte teneur en alumine Al_2O_3 et en oxydes de fer. Cette roche constitue le principal minerai permettant la production d'aluminium.

Elle se forme par altération continentale en climat chaud et humide. De structure variée, elle contient dans des proportions variables des hydrates d'alumine, de la kaolinite, de la silice et des oxydes de fer qui lui confèrent souvent une coloration rouge.

3.3 Les matières secondaires : Ajouts

3.3.1- La pouzzolane naturelle : [11]

La pouzzolane naturelle utilisée est d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de Béni-Saf. Le gisement est représenté par une montagne de forme conique appelée El-Kalcoul situé à la cote absolue de 236 m. Cette pouzzolane est essentiellement formé de scories et de pierres ponce bien stratifiées, de couleur variant du rouge au noir.

La composition chimique de la pouzzolane naturelle après broyage est montrée dans le tableau I.1

Tableau I.1 : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf. [11]

%Cao	%SiO ₂	%AlO ₃	%FeO ₃	%SO ₃	%K ₂ O	%Na ₂ O	%MgO	%Cl	%CaCO ₃
12.36	42.95	16.32	9.49	0.01	1.39	3.00	4.20	0.00	10.75

La surface spécifique de Blaine de la pouzzolane naturelle est: $SSB = 4326 \text{ cm}^2/\text{g}$.

La masse volumique absolue de la pouzzolane naturelle est : $\rho = 2,49 \text{ g/cm}^3$



Figure I.2 : Grains de pouzzolane. [12]

3.3.2-Laitiers de hauts fourneaux :

Ce sont des sous-produits de fabrication de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, de fondants et de cendres de coke. Ils peuvent être utilisés comme granulats dans le béton. Leur composition en oxydes et leur structure vitreuse obtenue par trempage à l'eau leur confèrent des propriétés hydrauliques latentes, ce qui permet d'envisager leur utilisation en tant qu'addition cimentaires [13]

Tableau I.2 : Caractéristiques chimiques du laitier [14]

%SiO ₂	%CaO	%Al ₂ O ₃	%FeO ₃	%MgO	
35.85	37.22	5.08	7.77	3.55	
%MnO	%NaO	%K ₂ O	%TiO ₂	%P ₂ O ₅	%PF
2.02	0.12	0.27	0.17	0.09	1.74

3.3.3- Les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W) : [15]

Elles sont recueillies dans les centrales thermiques fonctionnant au charbon et sont généralement utilisées pour la finesse de leurs particules, ce qui accroît leur réactivité. Pour qu'une variété de cendres volantes à faible teneur en calcium puisse avoir des propriétés liantes optimales, elle doit avoir un pourcentage de matière non liante inférieure à 5%, une teneur en Fe₂O₃ inférieure ou égale à 10 % et celle en CaO qui doit être très faible. La teneur en aluminosilicate doit être comprise entre 40-90 % de particules d'un diamètre équivalent inférieur à 45µm. Il existe trois types de classe de cendres volantes : les cendres volantes de classe C (proviennent de la lignite et sont riches en CaO), les cendres volantes de classe F (pauvres en CaO, proviennent de la combustion de la houille et sont les plus utilisées pour l'élaboration des géo-polymères à cause de leur faible teneur en CaO) (Xu and van Deventer, 2002) et les cendres volantes de classe N qui sont des aluminosilicates naturels ou synthétiques dont la somme des oxydes de silicium, aluminium et de fer est supérieur à 70 % et le taux de SO₃ est inférieur à 4 %

3.3.4- Les Calcaires (L, LL) : [15]

Sont obtenus après un broyage fin de roches naturelles présentant une teneur en carbonate de calcium (CaCO₃) supérieure à 75%. Ces additions ne participent pas à la création de résistances mécaniques du ciment durci.

3.3.5- Les schistes calcinés (T) : [15]

Acquièrent des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques lorsqu'ils sont activés thermiquement. C'est notamment le cas des schistes houillers brûlés dans les chaudières à une température d'environ 800°C. Les schistes calcinés contiennent principalement du silicate bi calcique (C₂S) et

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LA FABRICATION DU CIMENT

de l'aluminat mono calcique (CA) ainsi que des petites quantités de chaux libre (CaO), de sulfate de calcium et de silice. Ces ajouts finement broyés ont de fortes propriétés hydrauliques couplées à des propriétés pouzzolaniques.

3.3.6-Les sulfates de calcium : [15]

Sont incorporés au ciment principalement sous forme de gypse. Ils doivent être ajoutés en faibles quantités aux constituants du ciment en vue de réguler la prise lors de son hydratation. Ils sont introduits à hauteur de 5% sous forme de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de l'hémihydrate ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) ou de l'anhydrite (sulfate de calcium anhydre CaSO_4) ou tout mélange de ceux-ci.

3.3.7-Les fumées de silice (D) : [16]

C'est un sous-produit de la fabrication du silicium récupéré dans le système de dépoussiérage des fumées. D'un point de vue chimique, la fumée de silice est composée essentiellement de silice, sa teneur varie selon le type d'alliage produit. Les particules de la fumée de silice se présentent sous forme sphérique avec des diamètres allant de $0,1\mu\text{m}$ à 1 ou $2\mu\text{m}$, de telle sorte qu'une particule de fumée de silice est 100 fois plus petite qu'un grain de ciment.

Tableau I.3 : Caractéristiques chimiques de la fumée de silice. [18]

%SiO ₂	%CaO	%Al ₂ O ₃	%FeO ₃	%MgO	%Na ₂ O	%K ₂ O	%PF
87.3	0.4	1.0	4.4	0.3	0.2	0.6	0.6

3.4- Produit semi-fini :

3.4.1-Le clinker :

Résultant de la cuisson d'un mélange composé d'environ 80% de calcaire et de 20% d'argile (clinkérisation), le clinker prend la forme de granules durs avant d'être finement broyé pour entrer dans la composition d'un ciment. Le clinker possède des propriétés hydrauliques : il réagit avec l'eau pour former des hydrates stables et insolubles. [1]

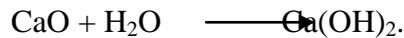
❖ Composition chimique du clinker : [5]

De la composition chimique des matières premières et de leurs proportions dans le mélange, on déduit la nature des éléments chimiques présents dans le ciment portland et leurs concentrations.

Le clinker portland comprend les oxydes suivant : CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, TiO₂, Na₂O, K₂O, MnO₂.

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LA FABRICATION DU CIMENT

- **CaO** : Il est lié avec SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , à l'état libre il provoque une inégalité de changement de volume du ciment lors de l'hydratation (expansion).



La résistance du ciment augmente en cas d'augmentation du pourcentage de CaO lié, cependant, la stabilité chimique diminue en milieu agressif. La teneur de CaO est de 63% à 67% dans le clinker.

- **SiO₂** : Il réagit avec CaO en donnant les silicates de calcium; un pourcentage élevé donne beaucoup de C₂S parce qu'il réagit avec tout le CaO, dans ce cas le ciment durcit lentement, sa résistance augmente à long terme.

L'augmentation de C₂S donne une grande durabilité au ciment et surtout au milieu agressif, sa teneur est de 21% à 24%.

- **Al₂O₃** : Il contribue à la prise et au durcissement rapide du ciment, cependant, une haute teneur en Al₂O₃ donne un ciment très sensible à la corrosion sulfatée, sa teneur est de 4 à 7%.

- **Fe₂O₃** : Il joue le rôle de fondant, il diminue considérablement la température de cuisson du clinker, il contribue à l'augmentation de la stabilité chimique dans les eaux sulfatées, sa teneur est de 2,5% à 4%.

- **MgO** : Une quantité élevée en MgO à l'état libre se trouve sous forme de péridote, provoque l'augmentation de volume lors de l'hydratation, sa teneur est inférieure à 5%.

- **TiO₂** : Sa teneur est inférieure à 0,5%, il provient des argiles.

- **MnO₂** : Il fait partie du clinker au cas où le laitier de haut fourneau est utilisé comme matières secondaires, sa teneur est 1,5%.

- **P₂O₅** : Se trouve sous forme d'impureté dans la composition du clinker, à une teneur de 1 à 2%, il ralentit le processus de durcissement du ciment, sa teneur est de 0,2 à 0,3%.

- **Na₂O et K₂O** : Une partie des alcalis se volatilise lors de la cuisson, sa composition est de 0,5 à 1%. Les alcalis provoquent la diminution de la résistance du ciment, parce qu'ils ralentissent l'hydratation des principaux minéraux.

La silice, l'alumine et le fer donnent à la cuisson un caractère acide, contrairement à la chaux qui est plutôt basique.

Ces proportions permettent de prévoir les qualités ultérieures du ciment.

Les oxydes dans le clinker doivent être liés en composés définis appelés minéraux.

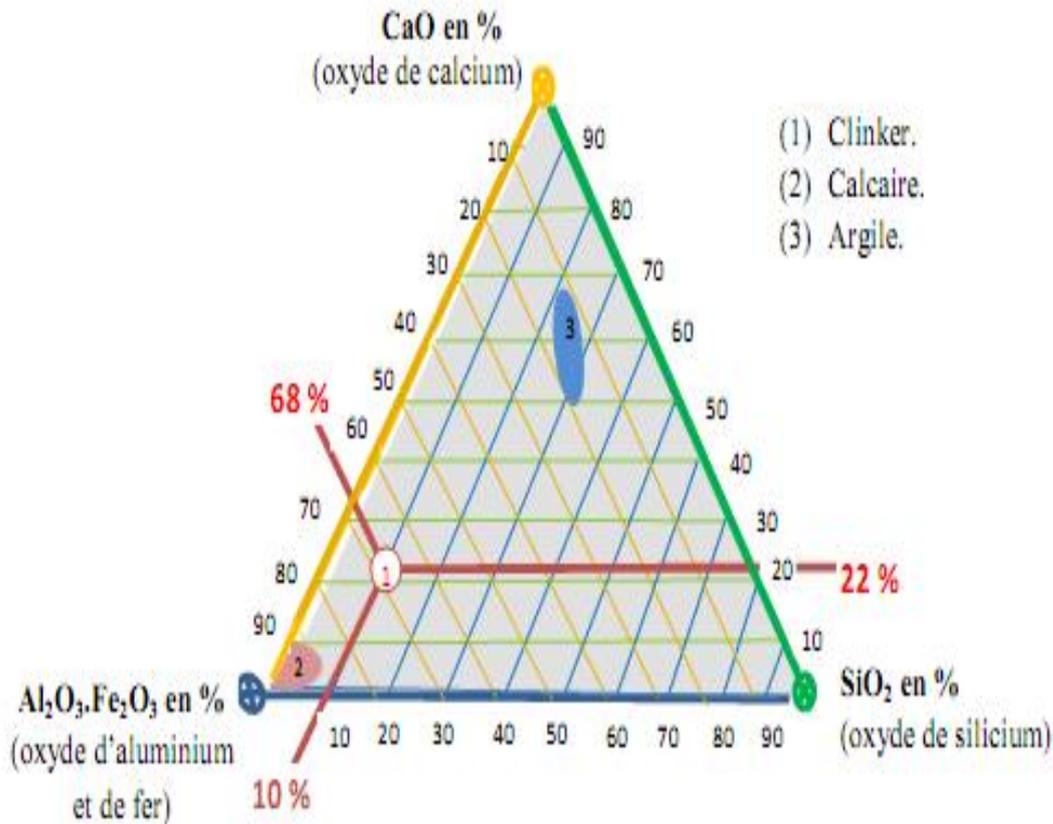


Figure I.3 : Composition chimique du clinker [18]

❖ Composition minéralogique du clinker : [5]

- Silicate tricalcique : Alite « C₃S » : 40 à 65%.

Le « C₃S » se trouve en très grande proportion dans le « CPA ». C'est l'élément actif du ciment artificiel. Il confère au ciment les résistances initiales à 28 jours de durcissement. Au microscope, il apparaît dans le clinker sous forme de grains de mêmes dimensions, à couleur bien marquée.

- Silicate bicalcique : Bélite « C₂S » : 8 à 35%.

Il confère au ciment des résistances moins élevées que le « C₃S » ; mais développe les résistances à long terme. Son aptitude au broyage est moins bonne que celle de « C₃S », car sa dureté est plus grande. Au microscope, il apparaît sous forme de grains arrondis.

- Aluminate tricalcique : Célide : « C₃A » : 1 à 13%.

Il confère au ciment une très bonne résistance initiale à 1 ou 2 jours de durcissement. Mais par la suite, il influe très peu sur cette dernière.

Il est sensible aux eaux de mer à cause des sulfates qu'il contient. Il forme avec les sulfo-aluminates de chaux, les sels de Candlot, souvent très expansifs. La réaction d'hydratation est fortement exothermique.

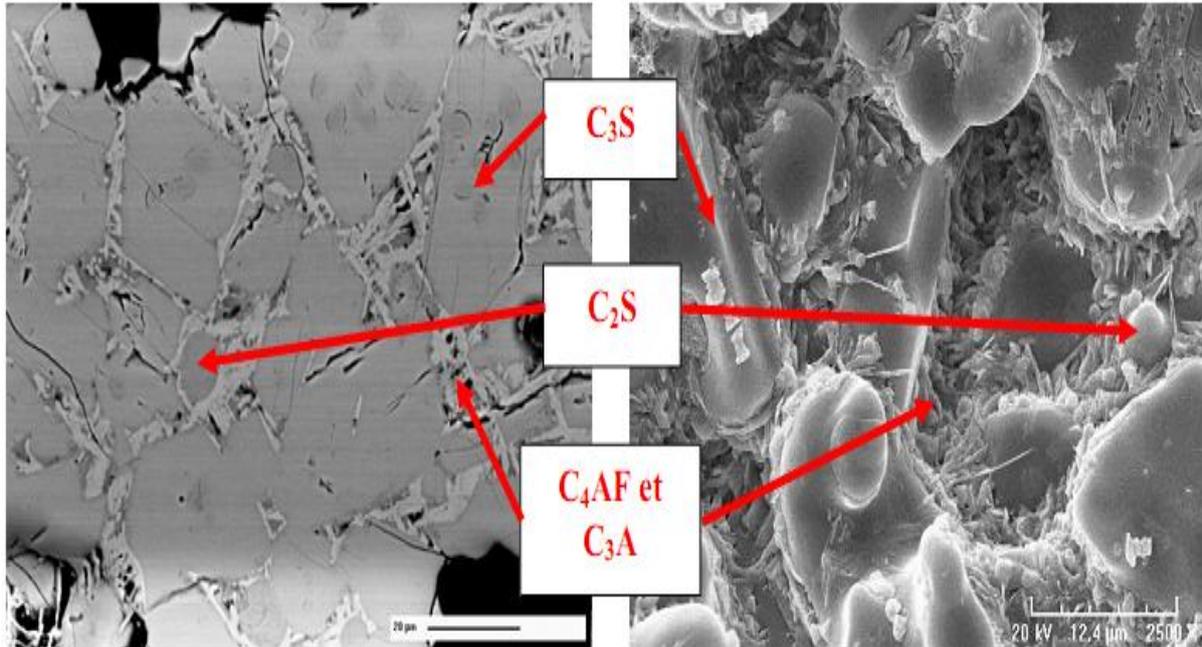


Figure I.4 : Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés [19]

3.5-Les additifs : [15]

Sont des constituants minéraux ou organiques ajoutés pour améliorer la fabrication ou les propriétés finales du ciment hydraté. La quantité totale des additifs doit être inférieure ou égale à 1% en masse de ciment. Pour les additifs organiques, la proportion de l'extrait sec doit être inférieure ou égale à 0,5% en masse de ciment.

4-Processus de fabrication de ciment :

La préparation du cru au cours de laquelle on réalise le mélange homogène du calcaire, d'argile de sable et de minerai de fer, peut être réalisée suivant quatre procédés différents : la voie sèche, semi - sèche, semi - humide et humide.

Dans la voie sèche: les matières premières broyées et séchées forment le cru ou farine qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four.

Dans la voie semi-sèche : la farine mélangée à de l'eau forme des granulats qui sont introduits dans un préchauffeur à grilles situé en amont du four ou dans un four long équipé de croisillons.

Dans la voie semi-humide: la pâte est d'abord débarrassée de son eau dans des filtres-presses. Le gâteau de filtre-presse est ensuite extrudé sous forme de granulats et introduit dans un préchauffeur à grilles ou directement dans un sécheur pour la fabrication du cru.

Dans la voie humide : les matières premières (dont la teneur en humidité est souvent élevée) sont broyées dans l'eau pour former une pâte pouvant être pompée. Elle est ensuite introduite directement dans le four où peut passer auparavant dans un sécheur. [5]

➤ Fabrication du ciment par voie sèche

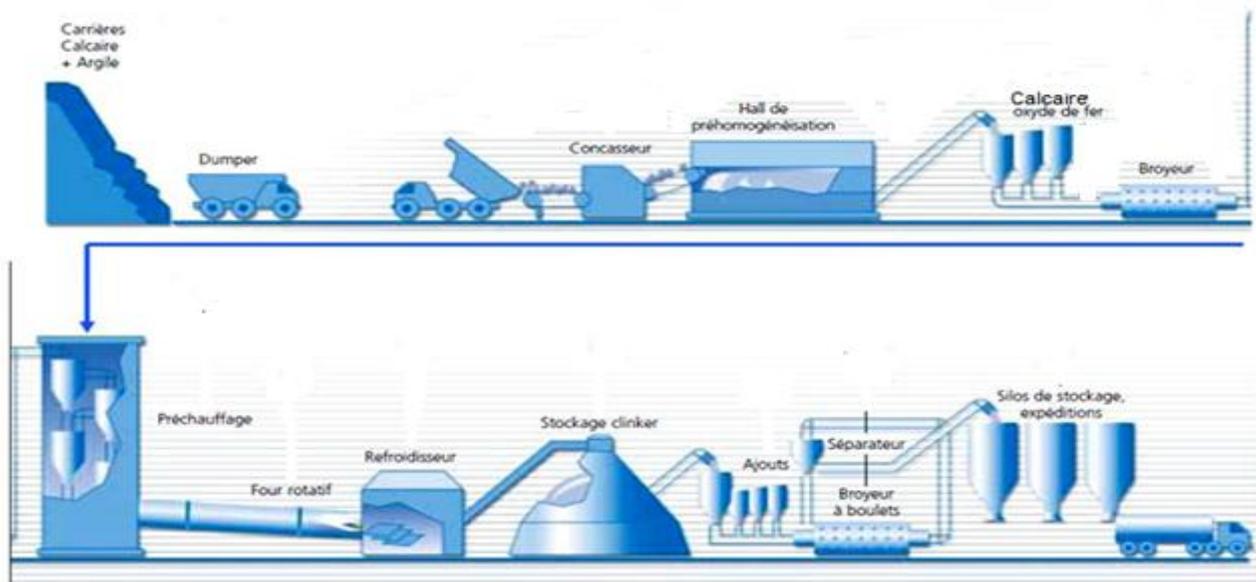


Figure I.5 : Schéma de la fabrication du ciment (source Ciments Calcia). [19].

4.1-Extraction :

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore par ripage aux bulldozers. La roche est reprise par dumpers vers un atelier de concassage. [2]



Figure I.6 : Carrière d'extraction d'argile et de calcaire [5]

4.2-Concassage :

Les matières sont concassées en carrière (1800m environ du site de l'usine) au début de 1200 t/h pour une granulométrie finale de 0 à 25 mm. [2]



Figure I.7: Concassage des matières premières au niveau de la carrière. [22]



Figure I.8: Camion de transport de la carrière [22]



Figure I.9: Transporteurs mécaniques et pneumatiques [22]

4.3-Préparation du cru :

Le mélange, acheminé à l'usine par transporteur couvert, est stocké dans un hall de pré homogénéisation qui compte deux tas, l'un en constitution, l'autre en reprise. [2]

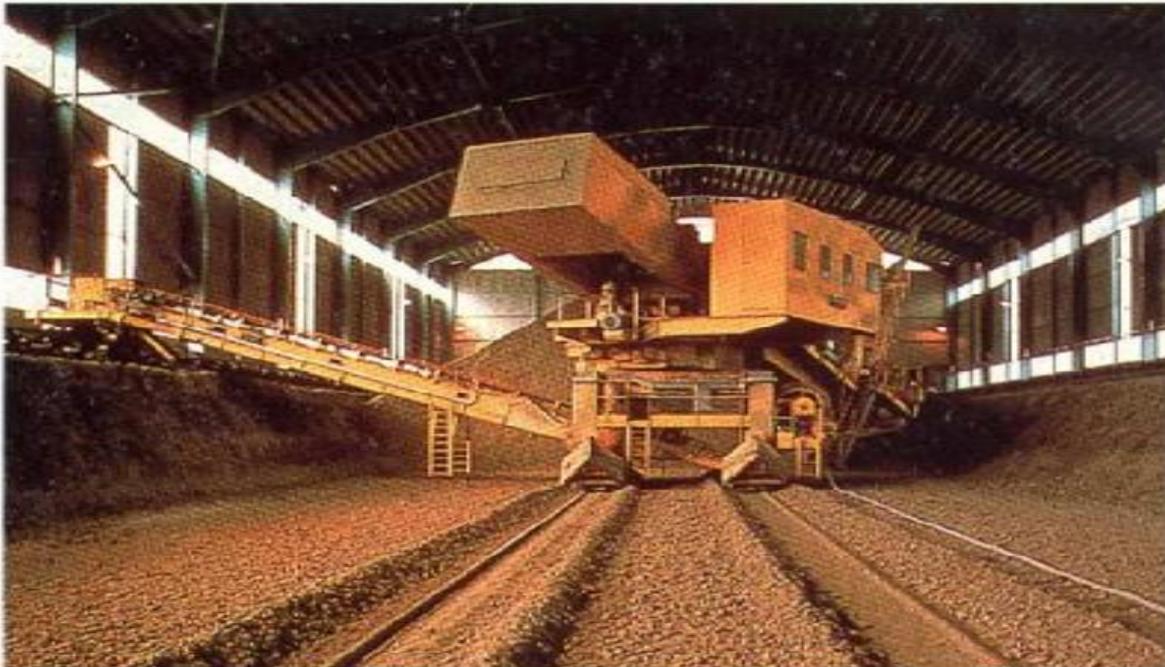


Figure I.10: Hall de pré-homogénéisation. [5]

4.4-Broyage du cru :

Le broyage et le séchage du cru sont réalisés à un débit de 270 t/h dans un broyeur à sortie centrale de 5m de diamètre et de 13.9 m de longueur, avec un compartiment de séchage et deux compartiments de broyage. [2]



Figure I.11 : Broyeur cru [21]

4.5-Séparation :

Cette phase consiste, suivant le type de séparateur utilisé, à envoyer au broyeur les particules insuffisamment broyées et à récupérer les particules fines contenues dans les gaz.

4.6- Homogénéisation :

La farine crue est homogénéisée en continu dans des silos, à a cone central de mélange, d'une capacité unitaire de 10000t. Pour accroître l'efficacité de l'homogénéisation, ces silos sont alimentés et soutirés simultanément.

4.7-Zone de cuisson:

La ligne de cuisson est constituée par :

- Un préchauffeur
- Un four rotatif
- Un refroidisseur

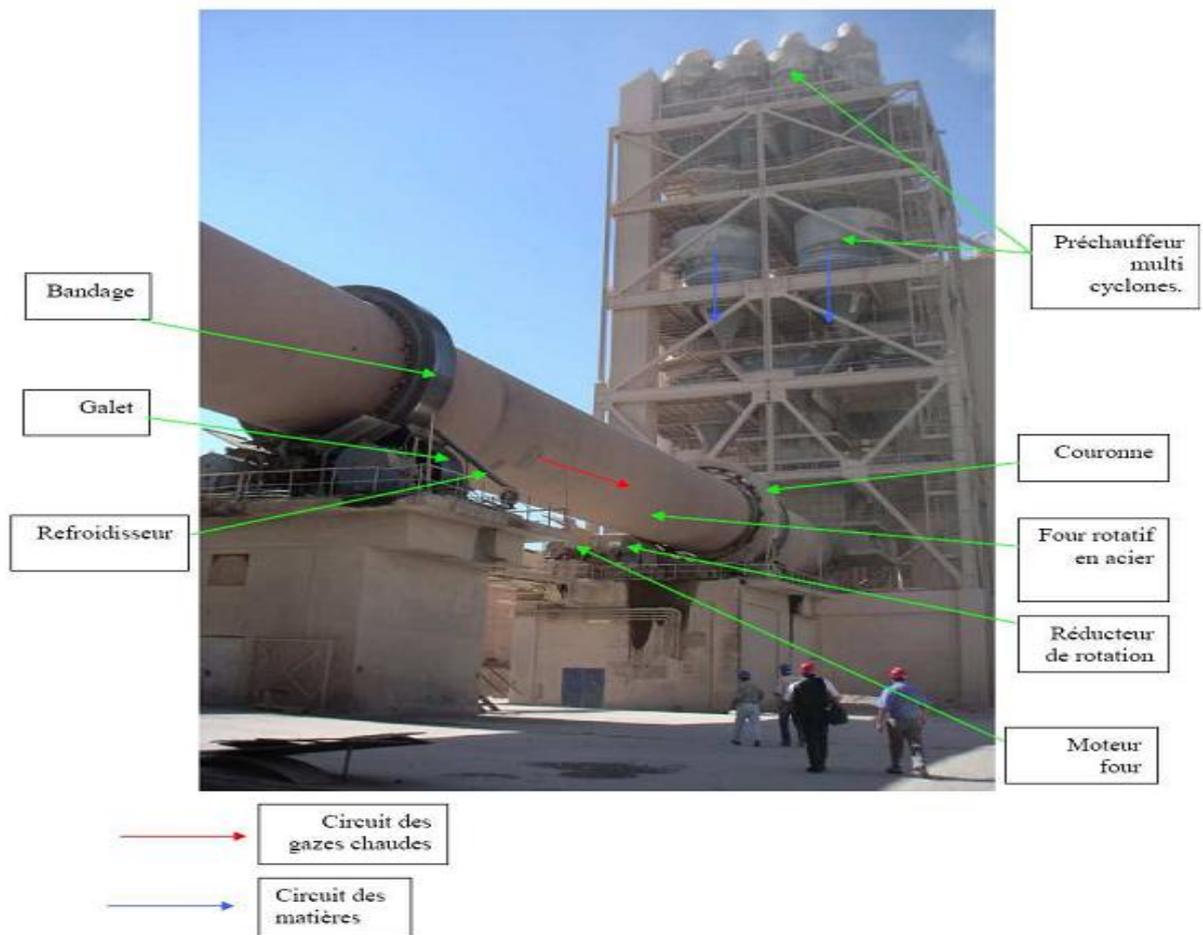


Figure I.12 : Le four rotatif. [5]

▪ Préchauffeur ou cyclones: [21]

Les gaz réchauffent la poudre crue qui circule dans les cyclones en sens inverse, par gravité. La poudre s'échauffe ainsi jusqu'à 800 °C environ et perd donc son gaz carbonique (CO₂) et son eau.

C'est un échangeur à contre courant destiné à préchauffer la farine avant son entrée dans le four, en récupérant la chaleur des gaz sortant du four environ égale à 100°C, par le fait que l'argile et le calcaire ont la même densité (2,70 g/cm³), un exhausteur monté sur les cyclones aspire les gaz de combustions et le mélange carrière, faisant une tornade qui garantit que tous les grains du crue subit la chaleur des gazes.

▪ Four rotatif: [21]

Le four constitué par une virole cylindrique de 90m de long et de 5.6m de diamètre protégé par de la brique réfractaire, incliné selon un angle de 1 à 4 degrés par rapport à l'horizontale. Le calcaire est chargé à l'extrémité supérieure, le combustible et l'air comburant étant brûlé à l'extrémité inférieure.

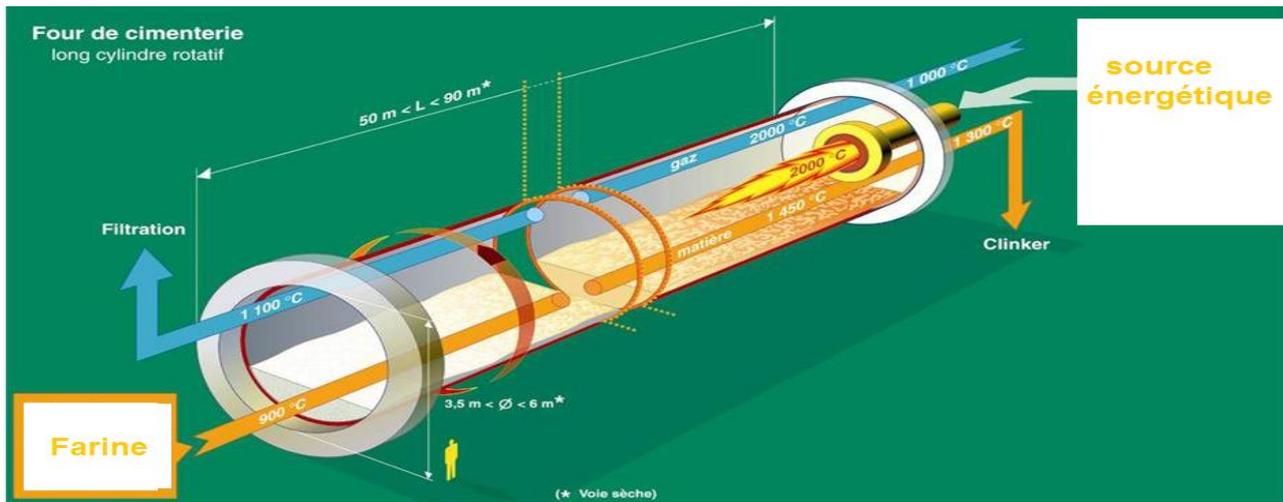


Figure 1.13: Schéma d'un four rotatif de cimenterie. [19]

▪ Refroidisseur:

Le refroidisseur a pour rôle d'abaisser la température du clinker tombant du four à une température d'environ 1135°C jusqu'à 80-100°C.

Il est équipé d'une batterie de ventilateurs fournissant l'air de refroidissement. [21]

4.8-Stockage du clinker :

La manutention du clinker est réalisée par des transporteurs métalliques vers les deux stocks polaires principaux de capacité unitaire de 30000 t un troisième stock de 3000 est réservé pour les incuits.

L'extraction de clinker est assurée par des extracteurs vibrants.



Figure 1.14: Les bulles de stockage du clinker de la cimenterie de Béni-Saf.

4.9- Broyage clinker :

Il est réalisé en continu dans des broyeurs alimentés à partir des stocks de clinker et des différents constituants et ajouts.

Le broyage a pour objectif, d'une part de réduire les granulats de clinker en poudre, d'autre part, de procéder à l'ajout du gypse (dont le rôle est de réguler le phénomène de prise), ainsi qu'à celui des éventuels autres constituants (pouzzolane, calcaire de correction) ce qui permet d'obtenir les différents types de ciments normalisés. [5]

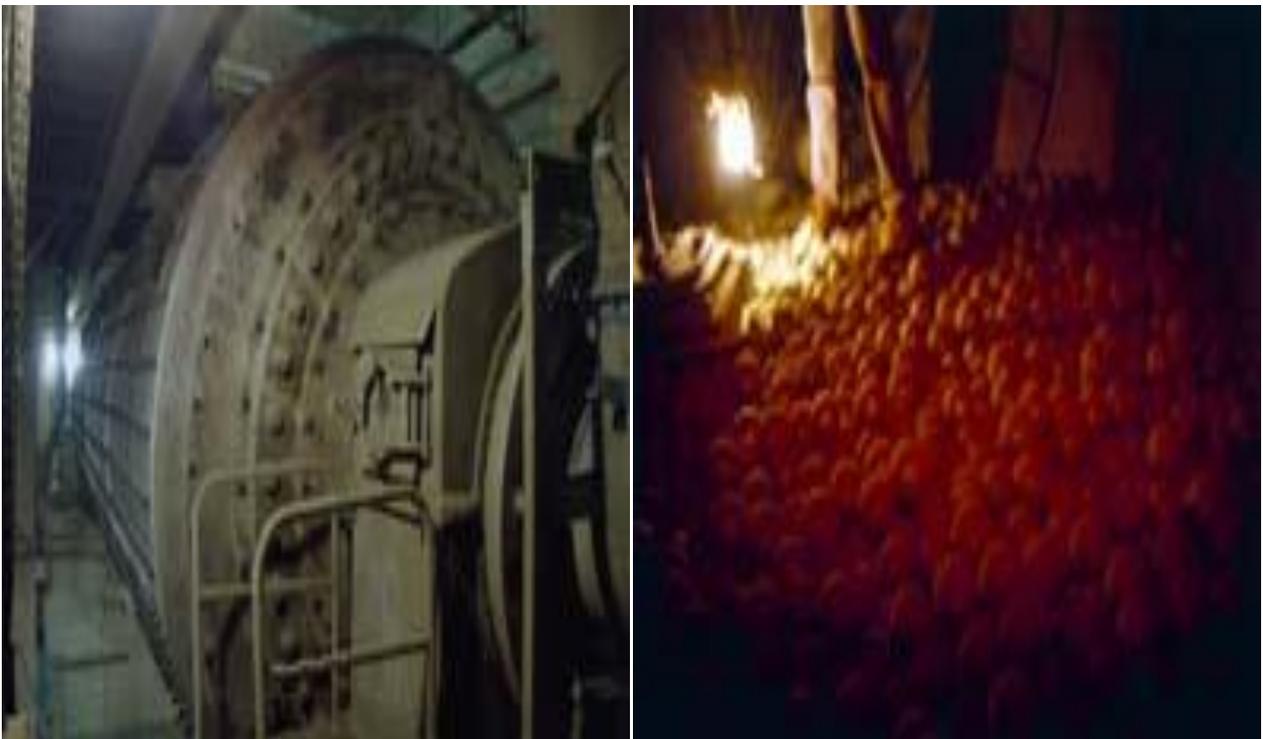


Figure I.15 : Broyeur cuit. [2]

4.10- Stockage, ensachage et expédition :

A la sortie du broyeur, le ciment est transporté vers des silos de stockage, pour être soit ensaché soit expédié en vrac. L'ensachage, qui dans les pays industrialisés ne représente qu'environ 30% de la production de ciment, s'effectue dans des sacs en papier kraft à l'aide de machines capables de remplir de 2000 à 4000 sacs par heure.

La livraison en vrac est assurée par camions, wagons ou péniches. [5]



Figure I-16 : Silos de stockage de ciment.



Figure I.17: Expédition. [2]

5-Différent types de ciments :

Tableau 1.4 : les types des différents ciments avec leurs compositions correspondantes

CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LA FABRICATION DU CIMENT

Notation	Clinker K	laitier de Haut Fourneau S	Fumées de silice D	Pouzzolane naturelles Z	Cendres volantes		Schistes calcinée T	Calcaires L	Constituents secondaires
					siliceuses V	Calciques W			
CPA-CEMI	95-100	-	-	-	-	-	-	-	0.5
CPJ-CEMII/A	80-94	↔ 6-20 ↔							
CPJ-CEMII/B	65-79	↔ 21-35 ↔							
CHF-CEMIII/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	0-5
CHF-CEMIII/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	0-5
CLK-CEMIII/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	0-5
CPZ-CEMIV/A	65-90	-	↔ 10-35 ↔		-	-	-	-	0-5
CPZ-CEMIV/B	45-64	-	↔ 36-55 ↔		-	-	-	-	0-5
CLC-CEM V/A	40-64	18-30	-	-	-	-	-	-	0-5
CLC-CEM V/B	20-39	31-50	-	↔ 31-50 ↔		-	-	-	0-5

CHAPITRE II :

CONTROLE DE QUALITE

1-Méthodes chimiques :

On détermine ces éléments par voie chimique classique ou par fluorescence RX.

➤ **Par voie chimique classique:[9]**

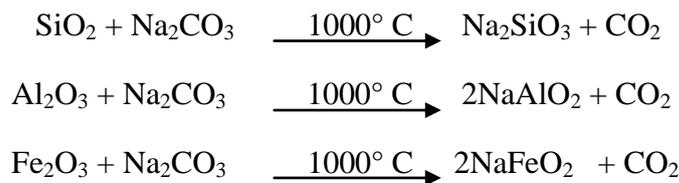
Les deux méthodes principalement utilisées pour la détermination d'analyses sont:

- ✚ l'attaque par fusion pour les incuits, c'est à dire l'entrée four et la matière première (argiles, calcaire, ajouts). Dans certain matériaux (matière cru), les liaisons chimiques entre les différents éléments le constituants sont très solides et ne peuvent être rompus par aucun acide minéral on organique (attaque directe), de ce fait on a recourt a une méthode de décomposition de ce produit a une méthode de décomposition de ce produit a une haute température par sel dit « FONDANT ». Ce fondant réagit avec les éléments du produit pour former des sels dont la plus part, sont solubles dans l'acide minérale (HCl).
- ✚ l'attaque directe par l'acide perchlorique HClO₄ pour les cuits c'est à dire clinker et ciment.

1.1-Attaque par fusion:[9]

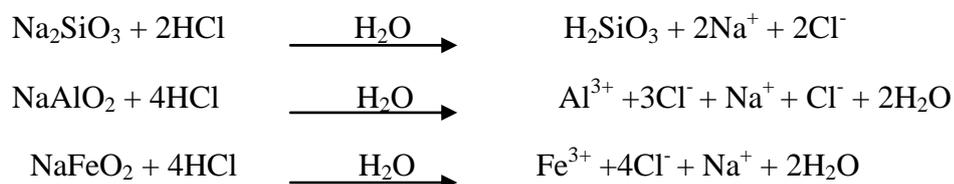
L'échantillon de masse égale à 1g (± 0.05 g) est broyé puis introduit dans un creuset en platine, Mettre une mesure d'hydrogène carbonate de sodium, le tout est mélangé et couvrir avec une deuxième mesure d'hydrogène carbonate de sodium et couvrir le creuset avec un couvercle en platine. Puis placé dans le four à une température de 1000°C pendant 20 minutes au minimum.

Le mélange subit alors les transformations chimiques suivantes:

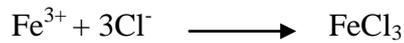
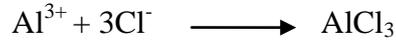


La totalité de la silice, de l'alumine et du fer se trouve sous forme de silicate, aluminate et ferrite sodium.

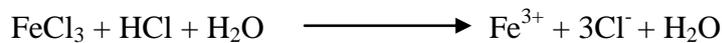
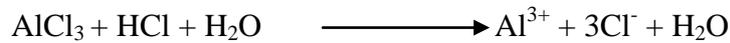
Après le retrait du forme manipulation et ensuite on le met (creuset avec le contenu) dans un bécher de 500 ml, on dilue environ 5 ml d'eau distillé chaude et attaque avec 25 ml d'HCl pur, après l'attaque complète de la matière, on retire le creuset de bécher après bien lavé, il y aura formation de chlorure et d'aluminium et de fer et d'acide silique conformément aux réactions chimiques suivantes :



On porte sur le bain sable afin de polymériser la silice (acide silique) séchage jusqu'à siccité, a ce produit gélatine $\text{HSiO}_2 - \text{HSiO}_2 - \text{HSiO}_2 - \text{HSiO}_2 - \dots$ et les métaux en tels.



Ensuite on ajoute environ 100 ml d'eau distillé chaude et 10 ml d'HCl pur, on porte un petit moment a ébullition les éléments sont puis en solution donc on obtient l'acide silicique (H_2SiO_3) polymérisé.



On filtre dans une fiole de 500 ml lave préalablement a l'eau distillé, sur un filtre moyen acide silicique (H_2SiO_3) polymérisé dans le filtre (précipité) et les autres éléments (alumine, fer, chaux, et magnésium et sulfate) passent sous forme ionique (Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) bien lavé la capsule, avec H_2O distillée très chaude, vérifier a ce que viens ne reste dans le fond de la capsule, ensuite de filtre 5 à 6 fois jusqu'à disparition complète dans chlore.

L'opération est terminée, la solution est refroidie sous un torrent d'eaux, on ajoute la fiole de 500 ml au trait de jauge, donc la solution est prête pour le prélèvement des aliquates (prise d'essai) pour la détermination des éléments Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} .

1.2-Attaque par acide perchlorique : « NA 442 »

L'attaque directe par HClO_4 se fait en général seulement pour les ciments portland et les clinkers.

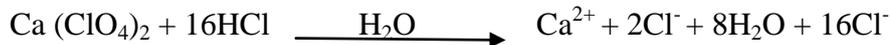
Après avoir étuvé l'échantillon à analyser et préparer la verrerie nécessaire, bécher de 500 ml, agitateur en verre, verre de montre, entonnoir, filtre moyen, creuset en platine.

Nous procéderons comme suit :

- peser 2 g de l'échantillon
- le mettre dans le bécher.
- le diluer avec l'eau distillée (2 à 3 ml).
- ensuite attaquer avec 10 ml d' HClO_4 .
- agiter le mélange avec une tige en verre en prenant soin d'écraser tous les grumeaux jusqu'à ce qu'il ne reste plus de matières inattaquée (grains noirs) après attaque complète de l'échantillon on obtiendra des perchlorates :

$\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2 - \text{Fe}(\text{ClO}_4)_3 - \text{Al}(\text{ClO}_4)_3 - \text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ et la silice n'est pas attaquée par aucun acide elle restera sous forme de SiO_2 .

- On évapore sur le bain de sable à température pour trop élevée (il y'a risque d'éclaboussure de matière à haute température) jusqu'à obtention d'une pate gélatineuse (ou jusqu'à départ total de fumée blanche).
- Retrier du bain de sable la capsule, et laisser reproduis légèrement, ensuite attaque le conteur dans la capsule avec 50 ml d'eau distillée chaude plus 10ml d' HCl à 50% en ayant bien sur faire sois de laver le verre de montre avec ces solutions ; on obtient en solution:



- En suite filtration sur un filtre moyen.
- laver le filtre avec l'eau distillée bouillante aussi que le bécber.
- S'assurer que rien n'est reste dans cette dernière (petit grain de silice), et jusqu'à disparation des chlorure sur le filtre (essai au vitrâtes d'argent AgNO_3 , cas de la détermination de la silice seulement) le filtrat est recueille dans une fiole de 500 ml et saura a la détermination des 4 oxydes pour complexométrie.

1.2.1- Dosage pour la détermination des oxydes :

1.2.1.1- Détermination de l'oxyde de calcium (CaO) :

Principe :

Le dosage de CaO est effectué par complexométrie au moyen de l'E.D.T.A après masquage des ions gênant en présence de la calcine, comme indicateur.

Mode opératoire :

- Mettre un barreau aimanté dans le bécber contenant le filtra, le mettre sur agitateur électrique.
- Ajouter de l'ammoniac 50% qui donne la couleur jaune.
- Ajouter 40ml de NaOH 2N pour avoir un pH entre 12 et 13.
- Verser 15ml de triéthanolamine pour masquer le Fe_2O_3 et AL_2O_3 .
- Ajouter l'indicateur de CaO. la calcine qui donne une couleur verte. Titrer avec E.D.T.A jusqu'au virage violet, soit le volume V. Nécessaire pour le dosage de la chaux.

$$\% \text{CaO} = V (\text{ml})_{\text{E.D.T.A}} \text{ versé} \times \text{coefficient de CaO}$$

- %CaO : Le pourcentage de la chaux.
- $V_{E.D.T.A\ CaO}$: Le volume d'EDTA nécessaire pour doser le CaO.

1.2.1.2-Détermination de l'oxyde de magnésium (MgO) :

Principe :

Le dosage de la somme (CaO+MgO) est effectué par complexometrie au moyen d'E.D.T.A après masquage des ions en présence de MgO à pH=10,5 la teneur en MgO se réduit par différence.

Mode opératoire :

- Prendre le même volume que pour la chaux
- Ajouter 20 ml de Triéthanolamine pour masquer le Fe_2O_3 et Al_2O_3
- Verser 10 ml de NH_3 pour avoir un pH de 10 à 11
- Ajouter quelques gouttes d'indicateur de MgO qui donne une couleur violette
- Titrer avec l'E.D.T.A jusqu' au virage incolore et prendre le volume.

$$\%MgO = (V_{MgO} - V_{CaO}) \times \text{coefficient MgO}$$

- V_{MgO} : volume E.D.T.A verse pour le titrage de MgO.
- V_{CaO} : volume E.D.T.A versé pour le titrage de CaO.

1.2.1.3-Détermination de l'oxyde de fer (Fe_2O_3) :

Principe de la méthode:

Le dosage de l'oxyde de fer est effectué par complexometrie au moyen de l'acide éthylène-diamine –tétra-acétique (E.D.T.A) en présence d'acide salicylique comme indicateur.

Mode opératoire :

Prendre 50 ml de la solution, on ajoute 3 gouttes de bromophénol, on verse de NH_4OH jusqu'apparition d'une teinte bleu fugitif (le dépassement de la teinte bleu provoque la précipitation de Al_2O_3). On ajoute 20 ml d'HCl à N/10 pour obtenir pH 1.5. Ajouter 15 ml de solution pH 1.5 (seul le Fe_2O_3 est complexé). Ajouter 15 à 20 gouttes d'acide salicylique qui donne une coloration violette. Chauffer jusqu'à 40-50° pour déterminer le dosage Fe_2O_3 . Verser l'E.D.T.A jusqu'à décoloration de la teinte violette.

$$\% Fe_2O_3 = V \text{ ml EDTA} \times \text{Coefficient de } Fe_2O_3$$

- % Fe_2O_3 : Le pourcentage de l'oxyde de fer.

- V_{EDTA} : Le volume d'EDTA nécessaire pour doser le Fe_2O_3

1.2.1.4-Détermination de l'alumine (Al_2O_3) :

Principe de la méthode :

- Le dosage de l'oxyde d'aluminium par complexometrie au moyen de D'EDTA
- L'indicateur étant composé de cuivre et de peridyl azotique naphthol (P.A.N)

Mode opératoire :

- Sur la solution ayant servie à doser Fe_2O_3 , on ajoute : acétate d'ammonium jusqu'au virage bleu de bromophénol à $pH=3.6$. Addition de 5ml d'acide acétique par effet tampon le pH se trouve fixer à 3,2.
- Pour complexer Al_2O_3 on ajoute 3 gouttes de Comlexonate de cuivre ne fausse pas le dosage.
- 10 gouttes de P.A.N qui donne la couleur rose violette avec les ions Al_2O_3 libre. Porte à ébullition pour accélérer la vitesse de complexassions d' Al_2O_3 .
- Titrer avec L'EDTA jusqu'à virage jaune persistant, la coloration violette apparaît tant qu'il reste de l'alumine non complexée.
- La teneur en oxyde d'aluminium est exprimée en % Al_2O_3 (masse) est par la formule :

$$\%Al_2O_3 = V_{EDTA} \times \text{coefficient de } Al_2O_3$$

1.2.2-Détermination de la silice (SiO_2) : [5]

- Peser le creuset vide préalablement lavé et calciné.
- Introduire le filtre contenant le gel de silice dans le creuset. Après séchage et calcination à $1000^\circ C$ pendant 1 heure, il y'aura décomposition de l'acide silicique comme suit :



- Retirer le creuset du four, laisser refroidir dans un dessiccateur contenant le silicagel, ensuite le peser afin de déterminer le pourcentage en SiO_2 conformément à la formule suivante :

$$\%SiO_2 = (P_2 - P_1) \times 100$$

- P_1 : poids du creuset vide.

- P₂ : poids du creuset après calcination.

1.2.3-Détermination de la chaux libre CaO_L :

- peser 1g de matière (clinker, ciment)
- le mettre dans un erlen propre, sécher
- Ajouter 25 ml d'alcool absolu
- Ajouter 05 ml de glycérine
- Ajouter quelques gouttes de phénophtaléine
- Connecter l'erlen à un réfrigérant pour récupérer les gaz volatiles
- Le mettre sur une plaque chauffante jusqu'à apparition d'une coloration violette
- Titrer par l'acétate d'ammonium, répéter l'opération jusqu'à ce qu'il ne reste plus de coloration.

$$\%CaO_L = T \times V$$

- T : titre d'acétate d'ammonium.
- V : volume d'acétate d'ammonium versé.

1.2.4-Détermination de la perte au feu (PAF) : [5]

Le pourcentage de H₂O, CO₂ dégagé pendant la calcination est déterminé selon le protocole expérimental suivant :

- Peser une quantité 2 g d'échantillon et l'introduire dans un creuset en platine (P₁).
- Mettre le creuset dans le four pendant une heure, puis dans un dessiccateur pendant 10 min.
- Peser le creuset (P₂) et calculer le pourcentage de la PAF selon la formule suivante :

$$PAF = (P_1 - P_2) \times 100/2$$

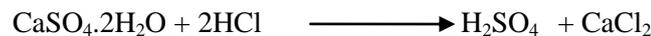
1.2.5-Détermination du pourcentage de SO₃ :

- Peser 1g de ciment
- Ajouter 20ml d'eau distillée et 15ml de HCl N/2
- Porter à l'ébullition
- Filtrer la solution dans un bécher (filtre rapide)
- Ajouter 15ml de BaCl₂ (100g/l)
- Chauffer et filtrer (filtre lent)

- Peser un creuset P₁
- Mettre le filtre et son contenu dans le creuset, ensuite calciner au four à 1000°C, pendant 30mn, retirer le creuset, laissé refroidir puis peser P₂.

$$\%SO_3 = (P_2 - P_1) \times 34,3$$

Vérification de la formule :



$$\diamond \%SO_3 = P_x \cdot 80 / 233,33 = (P_2 - P_1) \cdot 80 \cdot 100 / 233,33 = (P_2 - P_1) \cdot 34,3$$

1.2.6-Détermination des résidus insolubles :

- Peser 1 g de ciment.
- Ajouter 20 ml d'eau distillée et 15 ml de HCl N/2.
- Porter à l'ébullition.
- Filtrer la solution dans un bécher (filtre rapide)
- On met le papier filtre avec son contenu dans un bécher, on ajoute ensuite 100 ml d'eau distillée + 5g de bicarbonate de sodium.
- Chauffer jusqu'à l'ébullition
- Déchirer le papier filtre avec une spatule.
- Faire une 2 ème filtration (filtre moyen), rincer ensuite avec 25 ml d'acide HCl et 25 ml d'eau distillée.
- Peser un creuset P₁.
- Mettre le papier filtre déchiré et son contenu dans le creuset, ensuite calciner au four à 1000°C pendant 30 min, retirer le creuset, laisser refroidir puis peser P₂.

$$\%r\acute{e}s\acute{i}dus\ ins\acute{o}l\acute{u}b\acute{l}es = (P_2 - P_1)$$

1.2.7-Détermination de la teneur des alcalins (K_2O , Na_2O) :

- Prendre un creuset en platine que l'on introduit 1g de matière à analyser, ajouter :
- 10 ml d'eau distillée
- 30gouttes de H_2SO_4 +10 ml d'acide fluorhydrique (HF) concentré
- Mettre le creuset au bain de sable jusqu'à dégagement complète de fumés.
- Mettre le creuset dans béccher de 400 ml.
- Laver bien le creuset pour qu'il ne reste aucune trace de la matière
- Ajouter à la solution 20ml de H_3PO_4 $\frac{1}{2}$
- Faire passer la solution à l'appareil dit photomètre de flamme, ce dernier indique le pourcentage de K_2O ET Na_2O sur l'écran.

❖ Le pourcentage de K_2O est déterminé avec la formule suivante :

$$\% K_2O = \text{Valeur affichée} \times \text{Coefficient de } K_2O$$

❖ Le pourcentage de Na_2O est déterminé avec la formule suivante :

$$\% Na_2O = \text{Valeur affichée} \times \text{Coefficient de } Na_2O$$

1.2.8-Détermination du pourcentage de l'ajout pouzzolane dans le ciment :

Mode Opératoire :

- Peser 0.25 g de ciment puis ajouter
- 10 ml d'eau distillée
- 10 ml d'acide HCl N/10
- Faire chauffer jusqu'à l'ébullition
- Ajouter quelques goûtes de phénophtaléine
- Tirer avec NaOH N/4 et prendre le volume de NaOH Versé \longrightarrow V_1
- On répète la même méthode d'analyse pour le clinker et la pouzzolane, et chaque fois on prend le volume de NaOH V_2 . V_3
- Pour avoir le pourcentage de pouzzolane, on applique la formule suivant

$$\% \text{ Pouzzolane} = (V_1 - V_2) \times 100 / (V_3 - V_2)$$

- V_1 : volume de NaOH versé dans le ciment.
- V_2 : volume de NaOH versé dans le clinker.
- V_3 : volume de NaOH versé dans la pouzzolane.

➤ **Par fluorescence des RX : [5]**

Pour faire les analyses avec les RX on utilise soit les perles soit les pastilles

• **Préparation des perles :**

On mélange 0.9 g d'échantillon avec 9 g de fondant (66% de $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ + 34% de LiBO_2) et on le met dans la perleuse (figure II.1).



FIGURE II.1 : Perleuse [5].

• **Préparation des pastilles :**

Cette méthode ne consiste pas beaucoup de temps, puisque il suffit de broyé 10 g de l'échantillon a une granulométrie inférieure a 63 micron mètre on introduisant 1 g de sire (le fondant wax) et on le met dans une pastille, cette dernière subit une force de 150 K.N a l'aide d'une pastilleuse automatique. (Figure II.2)



FIGURE II.2: Pastilleuse.

En dernière étape on procède a l'analyse par fluorescence X en utilisant le programme correspond a l'échantillon a analysé soit la perle soit la pastille dans l'analyseur de fluorescence des rayons X (figure II.3).

Les résultats d'analyses des différents éléments sont exprimés en pourcentage.



FIGURE 11.3 : Analyseur RX.

2-Méthodes physiques :

Les essais physiques sont principalement réalisés sur le ciment (mesure de la finesse et tamisage alpine), sur la pâte c'est-à-dire : ciment plus eau (mesure de la consistance normalisée, du temps de prise et de la stabilité) ainsi que sur le mortier (résistances mécaniques : à la compression et à la flexion).

2.1-Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine :

But :

Pour la détermination de la finesse du ciment ou bien le degré de broyage

Principe :

La finesse du ciment est mesurée en observant le temps mis un volume fixé d'air pour traverser un lit de ciment compact à une porosité spécifique à 0,5

Mode opératoire :

Placer la grille au fond de la cellule, appliquer sur cette grille au moyen d'une tige à face intérieure plein un disque neuf de papier filtre .Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir. Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler couche supérieure du liant .puis placer sur celle –ci un autre disque neuf de papier filtre .Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule. Retirer le piston lentement.

Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleure au trait inférieur

Enduire de vaseline la partie.

- L'unité de la surface spécifique de Blaine est cm^2/g normes NA442/2000 :
- Ciment sans ajouts 2900 à 3000 cm^2/g
- Ciment avec ajouts > 3500 cm^2/g (paramètre technologique)

Rodé de la cellule et la placer sur son ajustage de lui imprimant un léger mouvement de rotation pour répartition la vaseline .Veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.

-Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que niveau du liquide atteigne la trait supérieur .Fermer le robinet .Mettre en marche un chronomètre sensible cinquième de seconde quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait .l' arrêter quand le niveau atteint le troisième trait

Noter le temps écoulait de la :

$$S = K \sqrt{e} \cdot \sqrt{t} / \rho (1-e) \sqrt{\mu}$$

- S : surface spécifique (cm^2/g).
- K : constante de l'appareil.
- e : porosité de la couche tassée (0.5).
- ρ : Masse volumique des grains.
- μ : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).

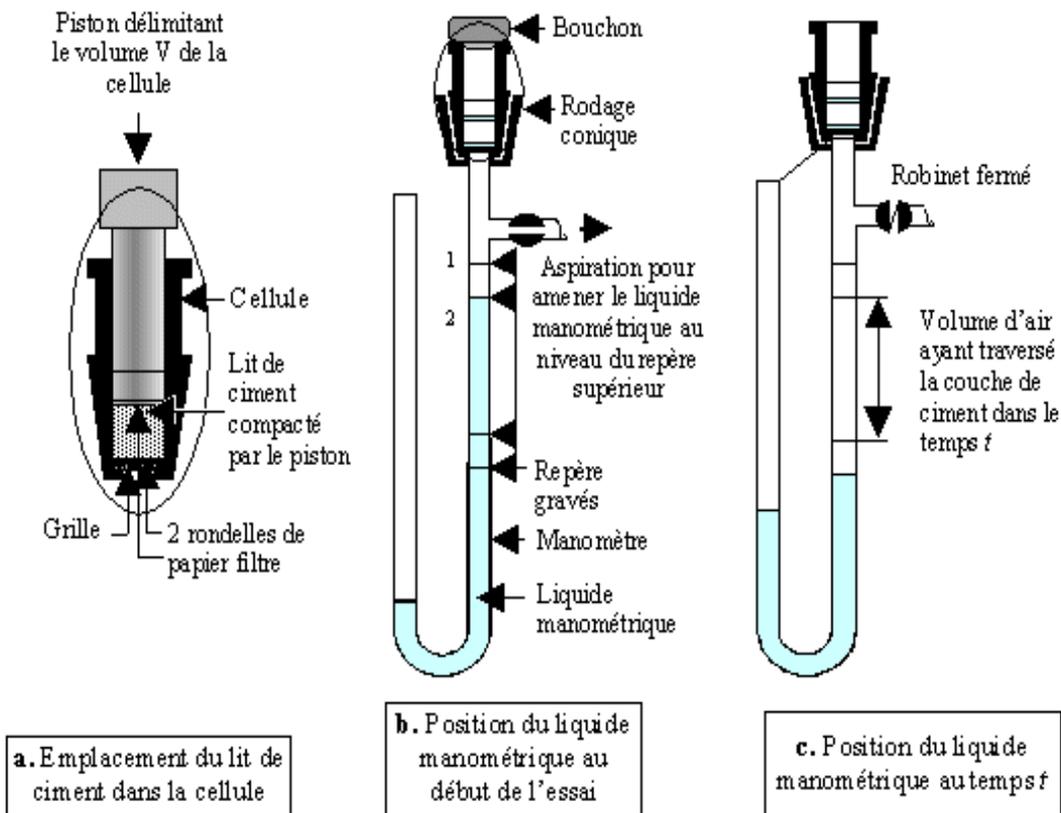


Figure II.4: Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine [5]

2.2- Mesure de la densité :

But :

On mesure la densité du ciment, pour déterminer le poids réel du ciment rempli dans les sacs.

Si la densité est supérieure à 1 (densité > 1) donc le sac doit contenir plus que son poids réel de 50kg.

Si la densité est inférieure à 1 (densité < 1) donc le sac doit contenir moins de 50 kg.

Mode Opérateur :

- Prendre le poids du pot métallique vide d'un $\text{dm}^3 \longrightarrow P_1$
- Remplir le pot avec du ciment non tassé.
- Peser $\longrightarrow P_2 \longrightarrow \text{Densité} = P_2 - P_1$



Figure II.5 : L'entonnoir.

2.3-Détermination du pourcentage des refus :

But :

Elle a pour but de déterminer le pourcentage des refus le ciment après le broyage.

Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage.

Mode Opérateur :

- Peser 100 g de ciment
- Tamiser à l'aide d'un pinceau un sur un tamis de 45 μ puis tamis de 90.
- Les particules au dessus du tamis représentant le pourcentage des refus.



Figure II.6: les tamis de 90 μ et de 45 μ .

- L'appareil Alpine donne automatiquement le pourcentage des refus.



Figure II.7 : L'appareil Alpine.

2.4-La consistance normale :

2.4.1-Définition :

La consistance normale caractérise la propriété rhéologique des pâtes.

Elle est déterminée par la méthode décrite par la norme NFP.15.402 et consiste en la détermination de la quantité d'eau qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesé pour obtenir une pâte ciment dite normale.

2.4.2-Pâte normale :

Définition :

La Pâte normale est une pâte de consistance normale ; c'est-à-dire telle qu'en opérant avec l'appareil de vicat. La lecture donnant l'épaisseur de la pâte

Restant entre l'extrémité de la seconde et le fonde du moule quant celle – ci cessé de foncer sous son propre poids est de $5 \text{ mm} \pm 1$

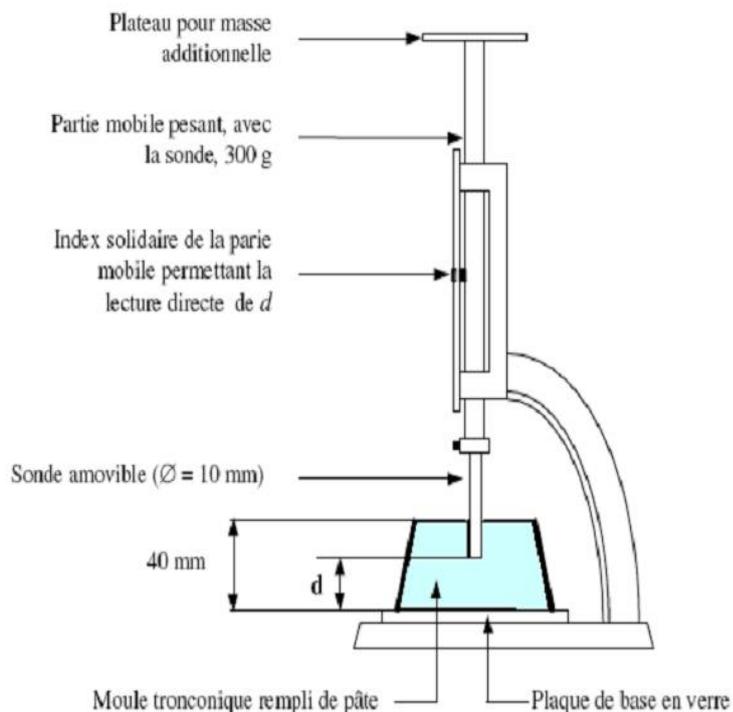


Figure. II.8: Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance [5]

2.4.3-Préparation de la pâte :

Verser dans le récipient du malaxeur la quantité d'eau préalablement déterminé par des totalement successifs de manière à réaliser la consistance normale lui ajoute 500g de ciment pour le moule tronconique.



Figure II.9 : Le malaxeur.

2.4.4-Vérification de la consistance normale :

L'appareil de Vicat, plateau nu, ayant été muni de la seconde de consistance, placer immédiatement le moule rempli de la pâte dans l'axe de la sonde, laissé descendre cette dernière perpendiculairement à la surface de la pâte et l'immobiliser à son contact, marquer un temps d'arrêt puis abandonner la sonde à elle-même sans vitesse initiale.

Procéder à la lecture d'épaisseur de la pâte, quand la sonde a cessé de descendre sous son propre poids.

Placer l'éprouvette dans l'armoire humide pour raison de déterminer les prises du ciment.

2.5-Essais de prise :

Définition:

L'essai de prise a pour but déterminer le temps de prise, c'est à dire qui s'écoule entre l'instant où liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise et fin de prise.

Principe de l'essai :

On détermine le début de prise ou fin de prise à l'aide de l'aiguille de Vicat s'enfonçant dans un moule tronconique remplis de pâte.

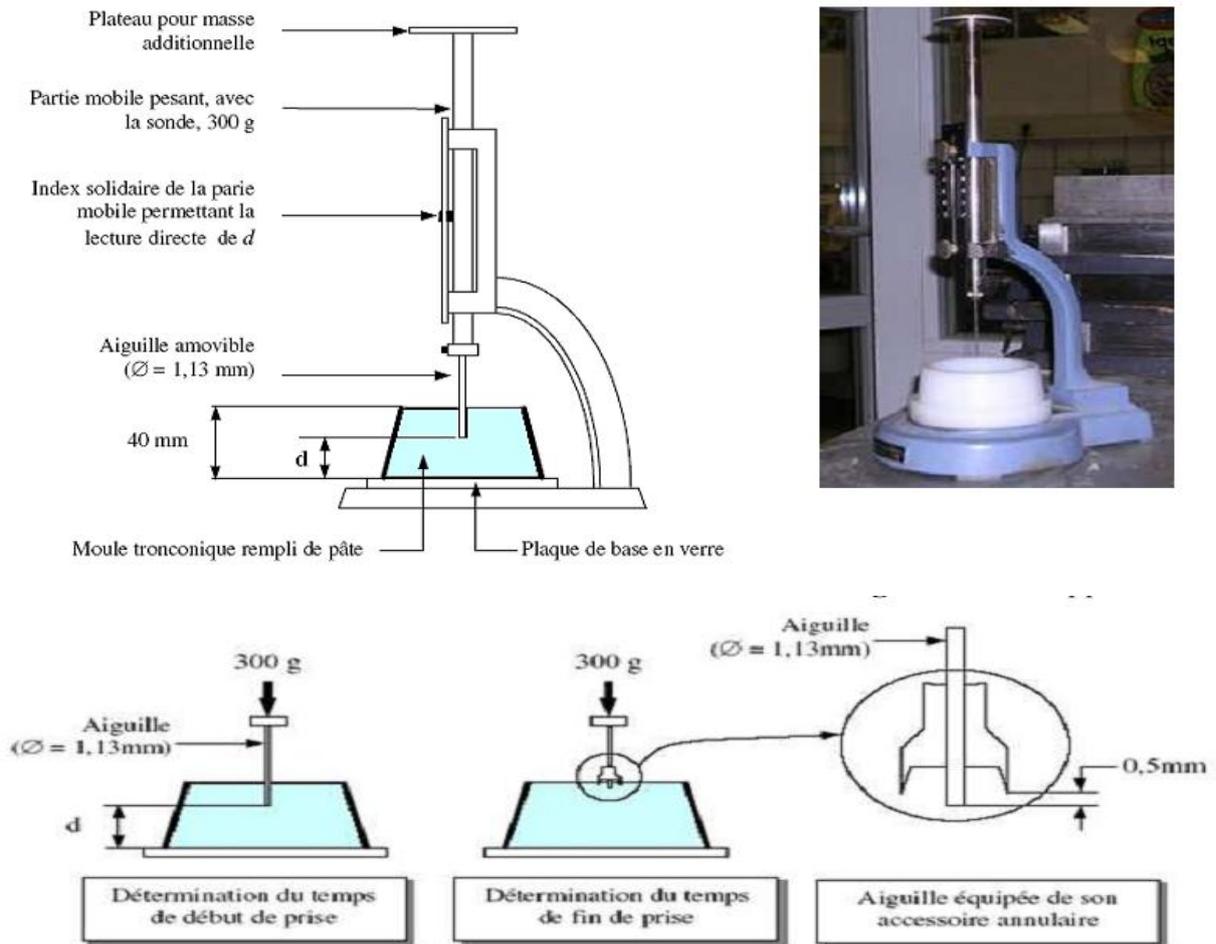


Figure II.10: Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible [5].

Dans le laboratoire d'essais physiques de la cimenterie de Béni Saf, il dispose d'un équipement appelé « Prisomètre automatique multiposte. »



Figure II.11: Prisomètre automatique multipostes.

2.5.1-Début de prise :

Le début de prise est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant du début de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat ne pendre plus jusqu'au fond c'est-à-dire s'arrête à une distance du fond du moule supérieur à $4 \text{ mm} \pm 1$

2.5.2-Fin de prise :

C'est la période qui sépare le début de gâchage de ciment jusqu'au moment où la sonde porte aiguille ne s'enfonce plus la pâte.

NB : L'essai de prise est normalement effectué sur mortier normal, il peut être effectué sur pâte normale, il est exécuté sur éprouvettes dans une armoire humide.

2.6-Essai d'expansion :

Définition :

Elle comporte deux essais effectués sur des éprouvettes de pâte pure, Cylindrique de 30 mm de diamètre et 30 mm de hauteur, conservée dans leurs moules constitués par une feuille de laiton (épaisseur 0.5 mm). Ces moules fendus selon une génératrice, comportant deux aiguilles longues de 15 cm (Aiguille le chatelier) soudé de chaque cote de la fente.

La variation de l'écartement initiale des ces aiguilles renseignera sur la valeur du gonflement.

L'essai de déformation à chaud décèle la présence de chaux vive libre CaO_L surcuit et de magnésie expansives (MgO).



Figure II.12: Aiguille de châtelier.

Mode opératoire :

- Remplir le moule d'expansion par la pâte préparé.
- Mettre sur plaque de verre et arroser la surface à l'aide d'une truelle.
- Couvrir d'une plaque de verre.
- Conserver les aiguilles dans l'armoire humide pendant une journée.
- Après 24 heures, enlever les aiguilles de l'armoire humide on marquer l'écartement entre les deux aiguilles et les mettre dans un bain marie de température 100 ° c, pendant 3 heures.
- Mesurer après 3 heures l'écart initial (pendant la confection du moule) représente l'expansion à chaud.

Stabilité = C-A

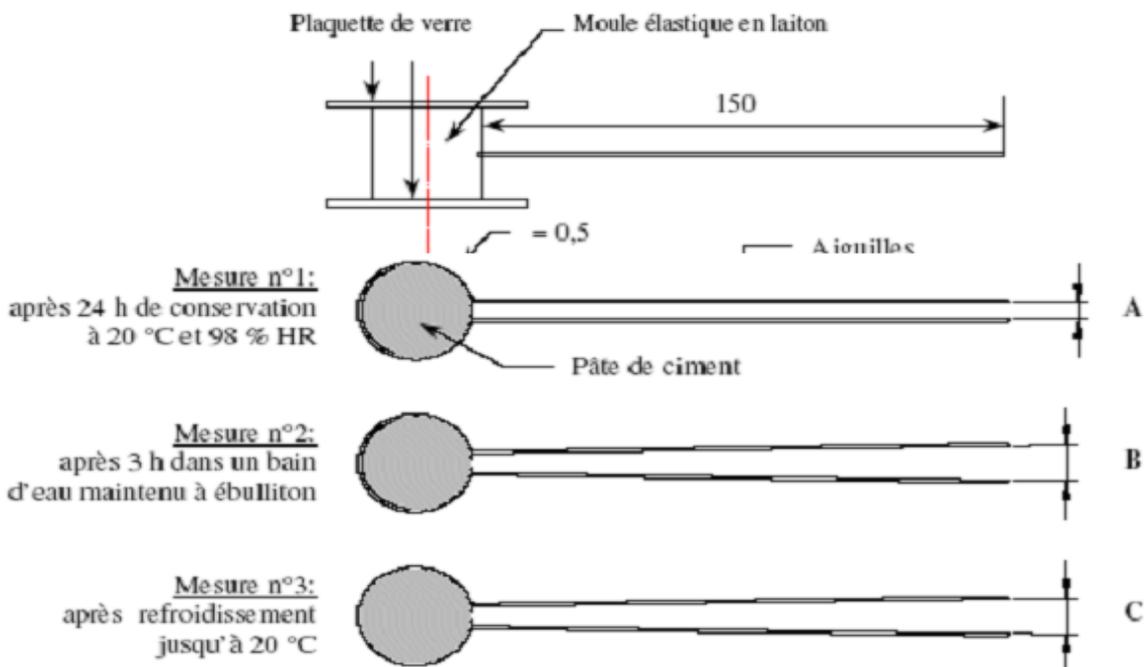


Figure II.13: Essai de stabilité avec l'appareil de chatelier[5].

2.7-Essais mécaniques (flexion –compression) :

Définition :

Ils ont pour but de mesurer les résistances aux différentes contraintes au bout d'un certain temps.

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la compression des liants hydrauliques.

Préparation de mortier normal

- Le malaxeur étant en position de fonctionnement.
- Verser 225 ml d'eau dans le récipient lui ajoute 450 g de ciment
- Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute dans les 30 derniers secondes introduire 1350 g de sable normal sec.
- Mettre le malaxeur a la vitesse rapide pendant 30 seconds après fait arrêter le mouvement pendant 90 seconds, reprendre le mélange pendant 2 mn à la vitesse rapide
- Le mortier obtenu, peut être bien tassé après un doublé dans la chambre humide à température $(20 + 1) ^\circ c$
- Après 24 heures, on fait le démoulage et on conserve les éprouvettes dans le bain d'eau.
- L'éprouvette pour 2 jours, 1 éprouvette pour 7 jours et 1 éprouvette pour 28 jours.



Figure II.14: Chambre humide [5].



Figure II.15: Malaxeur automatique.

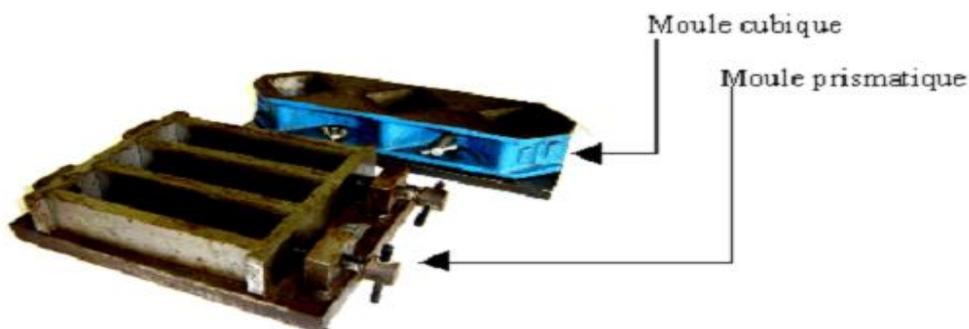


Figure II.16: Moules pour moulage des éprouvettes de mortier [5].



Figure II.17: Appareil choc.



Figure II.18: Appareil de flexion.



Figure II.19: Appareil de compression.

Confection de l'éprouvette

Le mortier obtenu est introduit dans un moule métallique de dimension normalisé (4X4X16) cm³ on le fixe sur la table à choc ou il peut être bien tassé.

Après un double de 60 coups, puis on racle la surface du moule .Ensuite on met

Le moule dans une chambre humide à température 20 °c après 24 heures on fait le démoulage et on conserve des éprouvettes dans le bain d'eau à 2 jours ,7jours et 28 jours.

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la Figure II.20

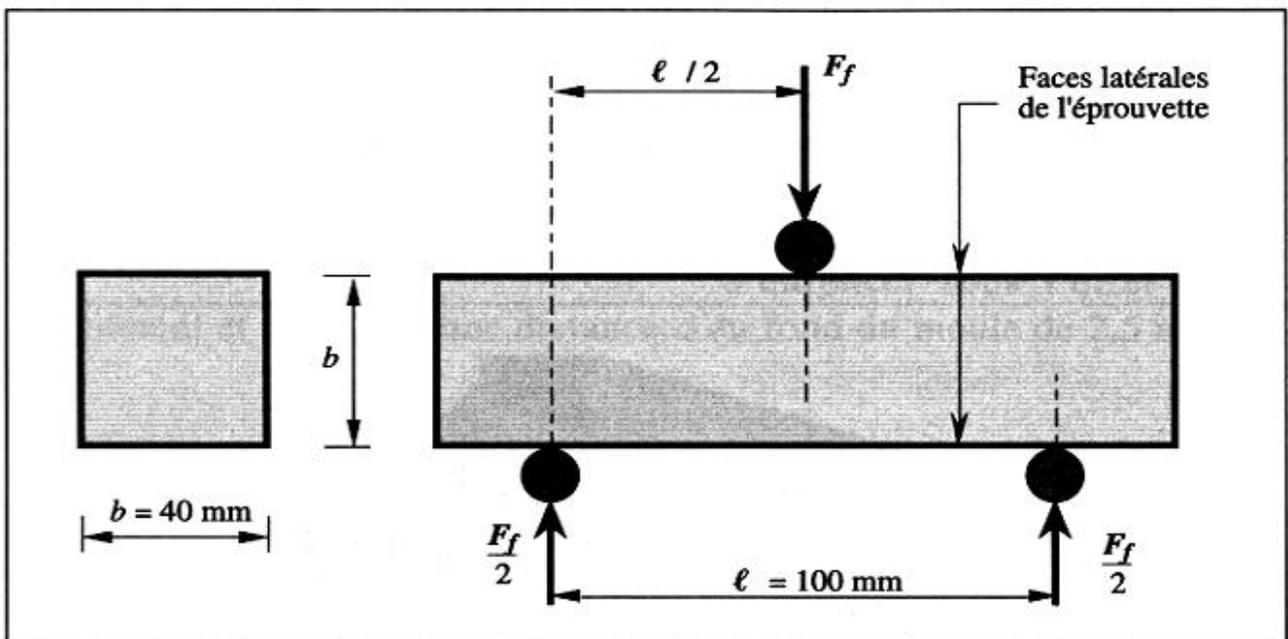


Figure II.20 : La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément. [5]

Le calcul de la résistance à la flexion R_f (en N/mm²) se fait au moyen de la formule suivante :

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

Où :

- R_f : la résistance à la flexion, en newtons par millimètre carré.
- b : le côté de la section carrée du prisme, en millimètre.
- F_f : la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.
- l : la distance entre les appuis, en millimètre.

Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression comme indiqué sur la figure II.21 ci-dessous :

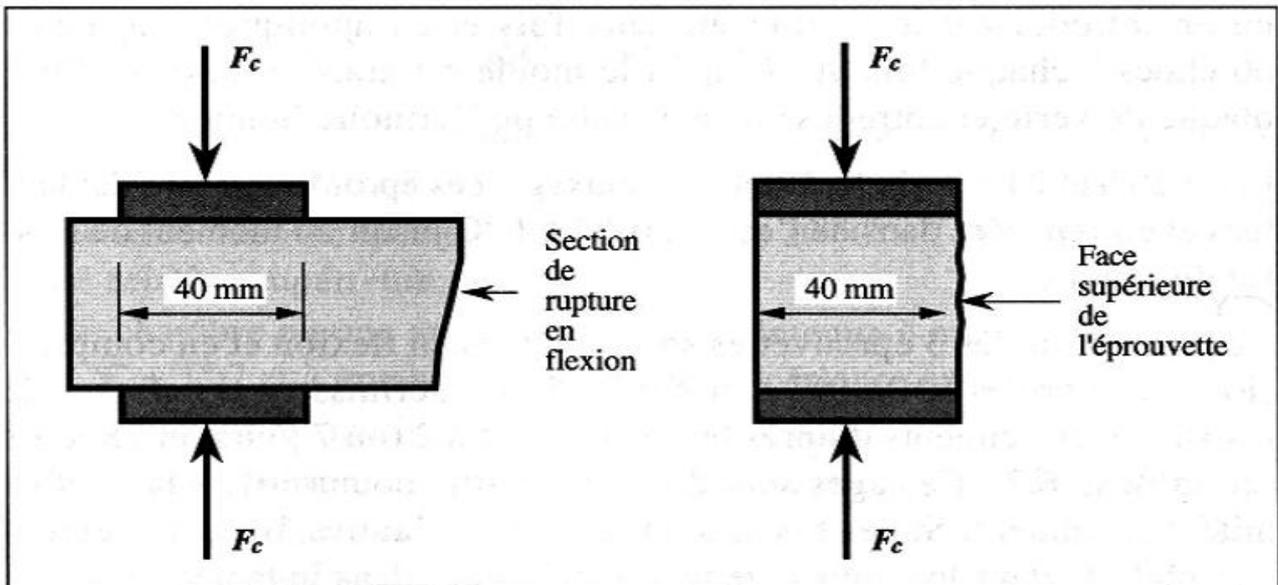


Figure II.21 : Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression

Le calcul de la résistance à la compression R_c (en N/mm²) Se fait au moyen de la formule suivante :

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

Où :

- R_c : la résistance à la compression, en newtons par millimètre carré.
- F_c : la charge maximale à la rupture, en newtons.
- 1600= 40 mm x 40 mm est l'aire des plateaux ou des plaques auxiliaires, en millimètres carrés.

Chapitre III:
Préparation des échantillons
et analyses des
résultats d'essais

Préparation des échantillons

1-prélèvement des échantillons

Les échantillons sont prélevés dans le hall des ajouts pour la pouzzolane et le gypse, le clincker a été prélevé dans la bull I clincker, et l'opération qui a pris du temps est celle du prélèvement de l'échantillon des incuits car notre but est d'utiliser un échantillon qui présente un teneur élevée en chaux libre.

La quantité prélevée est de 05Kg pour chaque échantillon.

2-Séchage des échantillons

Cette opération est pour but d'éliminer l'humidité pour nous permettre d'avoir un bon broyage, en utilisant la plaque chauffante pour tous les échantillons à part le gypse qu'on fait un étuvage dans une étuve à une température de 45°C pour éviter la déshydratation de gypse.

3-Broyage

Le broyage des échantillons a été faite par un broyeur à disque en respectant la même durée de broyage de deux minutes pour chaque échantillon.

4-pesage et répartition des échantillons

On a préparé 02Kg pour chaque échantillon, on fixe le taux de gypse et de pouzzolane, ainsi en variant dans le pourcentage des incuits en débutant avec 05 pour cent jusqu'à 25 pour cent.

Le nombre d'échantillons préparés est de 05, ainsi un échantillon de ciment produit dans la cimenterie "ciment1" avec le clincker qu'on a utilisé dans notre étude.

CHAPITRE III: PREPARATION DES ECHANTILLONS ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS

La composition des échantillons est comme suit:

	Ciment 1	Ciment 2	Ciment 3	Ciment 4	Ciment 5	Ciment 6
Gypse	3%	3%	3%	3%	3%	3%
Pouzzolane	10%	10%	10%	10%	10%	10%
Incuits	0%	5%	10%	15%	20%	25%
Clincker	87%	82%	77%	72%	67%	62%

Les résultats d'analyses de ces échantillons sont établis dans le tableau suivant:

* Résultats d'analyses chimiques

échantillons oxydes	Clincker incuit	Ciment 1	Ciment 2	Ciment 3	Ciment 4	Ciment 5	Ciment 6
SiO₂	21.50	26.45	26.21	26.00	25.80	25.62	25.46
Al₂O₃	5.26	5.96	5.92	5.89	5.86	5.84	5.82
Fe₂O₃	2.69	2.97	2.95	2.94	2.92	2.92	2.84
CaO	63.27	58.21	58.45	58.67	58.87	59.05	59.31
MgO	1.50	0.71	0.74	0.78	0.81	0.84	0.86
SO₃	0.55	1.55	1.51	1.45	1.42	1.38	1.22
Na₂O	0.34	0.45	0.44	0.44	0.43	0.43	0.42
K₂O	0.47	0.37	0.37	0.37	0.38	0.38	0.39
Cl-	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Perte au feu	3.27	2.04	2.09	2.15	2.20	2.24	3.01
CaO libre	6.74	0.90	0.96	1.00	1.30	1.60	1.80

CHAPITRE III: PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS

NB: la composition minéralogique de l'échantillon des incuits est comme suit :

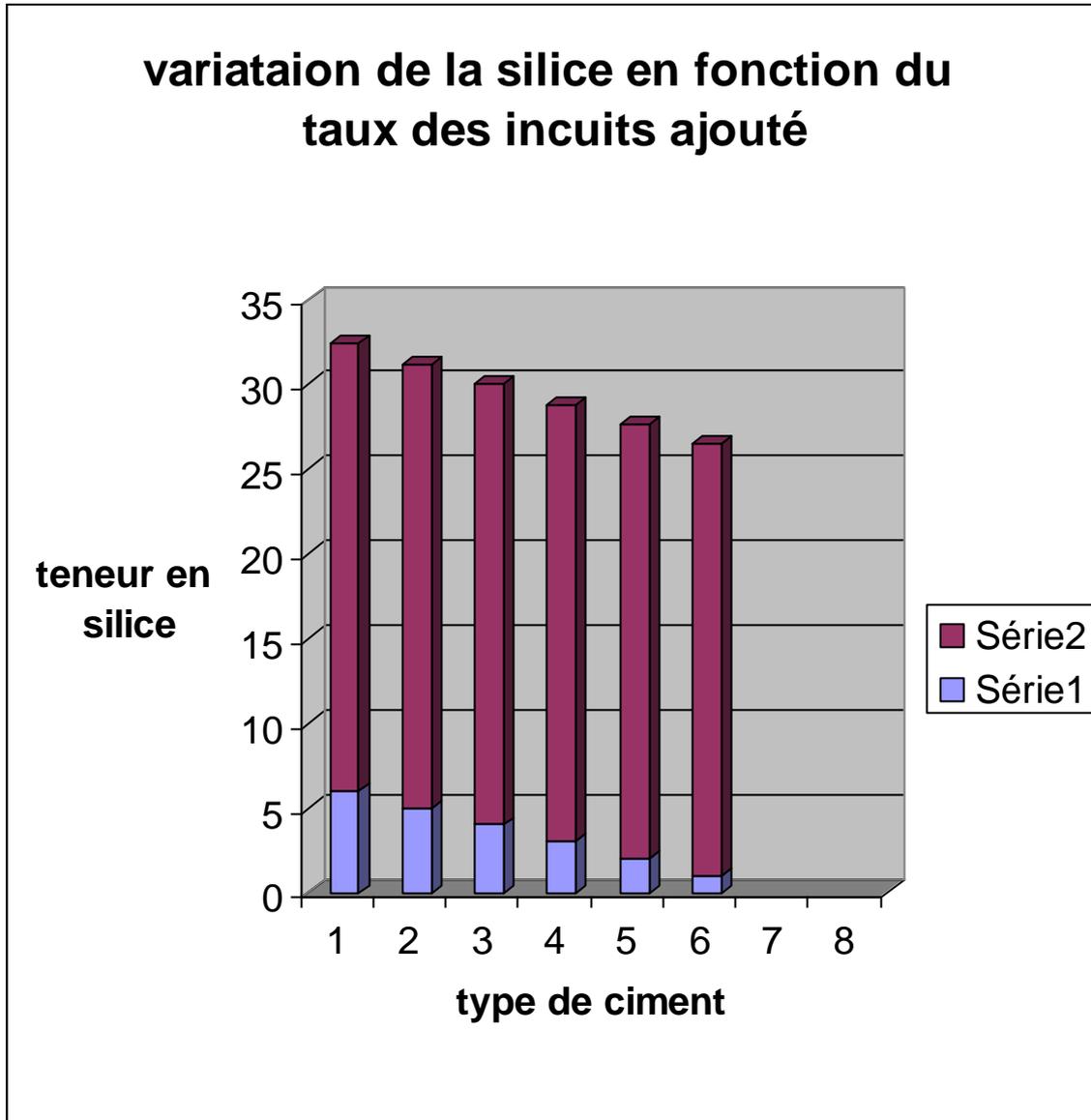
%C3S	25.90
%C2S	42.10
%C3A	9.40
%C4AF	8.20

Résultats d'analyses physico mécaniques*

Echantillons Désignation		Ciment 1	Ciment 2	Ciment 3	Ciment 4	Ciment 5	Ciment 6
(% E/C)		28.68	29.60	29.00	29.60	28.00	29.00
SSB (Cm2/g)		3373	3326	3180	3155	3130	3080
Densité (g/cm3)		1.025	1.038	1.055	1.080	1.10	1.121
Expansion à chaud (mm)		0.00	0.00	0.00	0.50	0.50	1.50
Prise (min)	Début	200	163	195	198	210	250
	Fin	263	220	262	258	270	305
Refus (%)	µm100	1.10	2.70	4.70	5.40	6.60	8.40
	µm200	-	-	-	-	-	-
Résistance à la flexion (MPas)	02j rs	3.64	3.51	3.41	2.10	2.02	1.87
	07j rs	6.51	6.34	6.34	6.17	6.00	5.82
	28j rs	7.93	7.70	7.63	7.59	7.40	7.28
Résistance à la compression (MPas)	02j rs	1.57	1.54	1.28	1.22	1.13	0.93
	07j rs	34.13	33.54	32.03	31.25	29.68	28.12
	28j rs	45.27	43.74	42.61	39.0	37.19	36.15

Graphes et interprétations

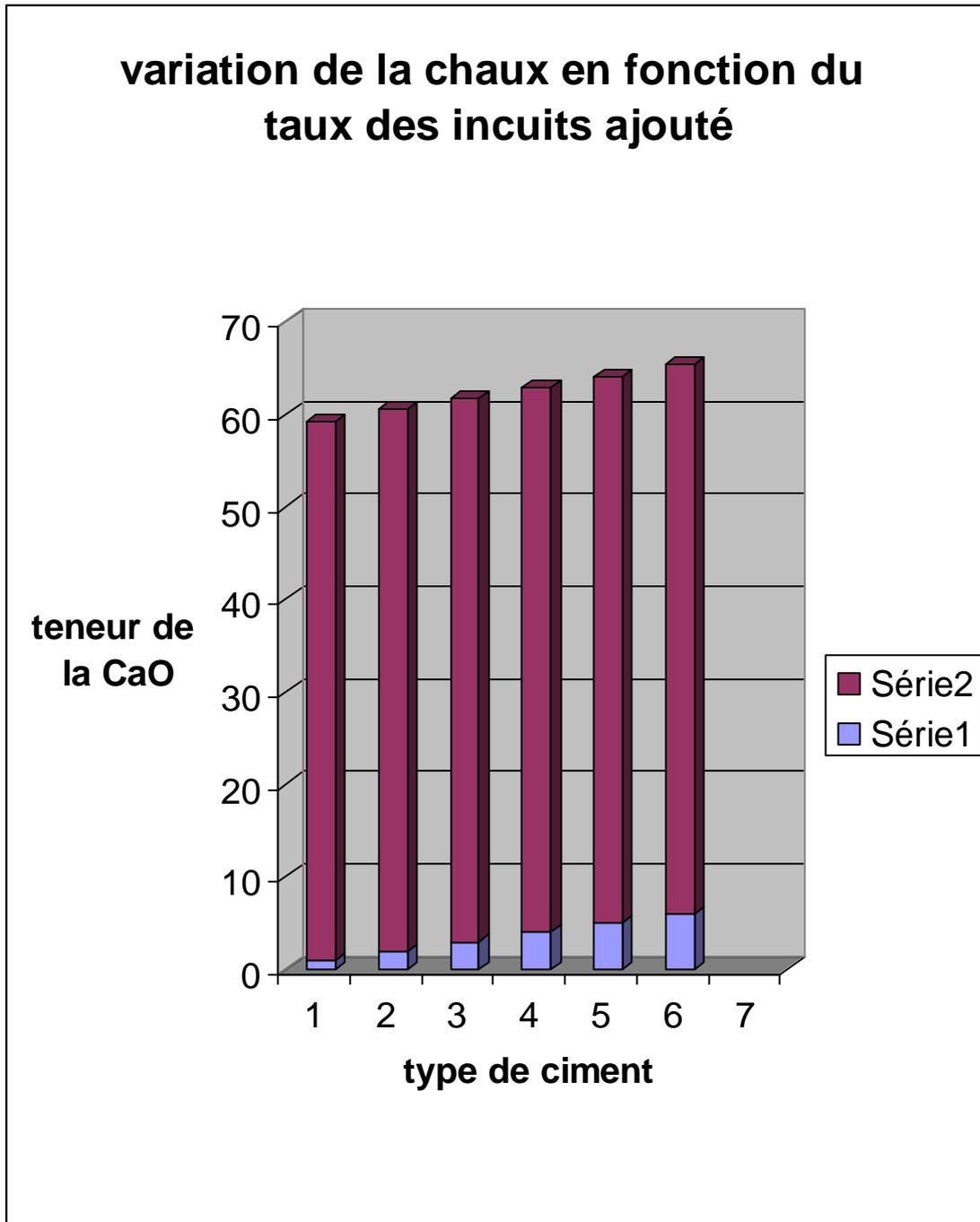
Silice "SiO₂"



Interprétation

on remarque que la teneur en silice diminue avec l'augmentation du taux des incuit représenté dans ce histogramme par le type de ciment qu'on présenté sa composition dans le tableau précédent auparavant.

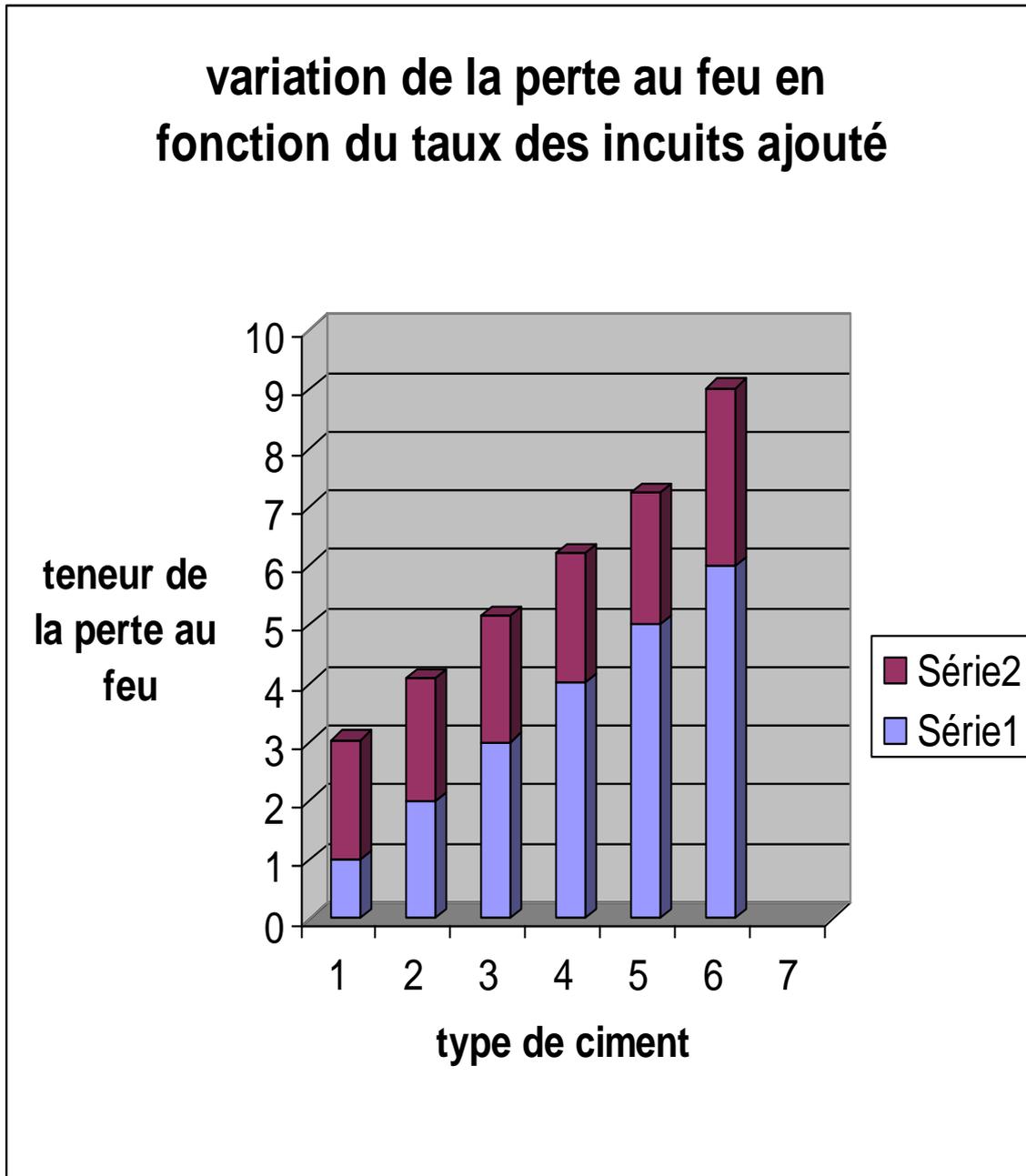
Oxyde de calcium "Chaux" CaO



Interprétation

Il existe une relation proportionnelle entre le taux des incuits ajouté et la quantité de la chaux sur le ciment.

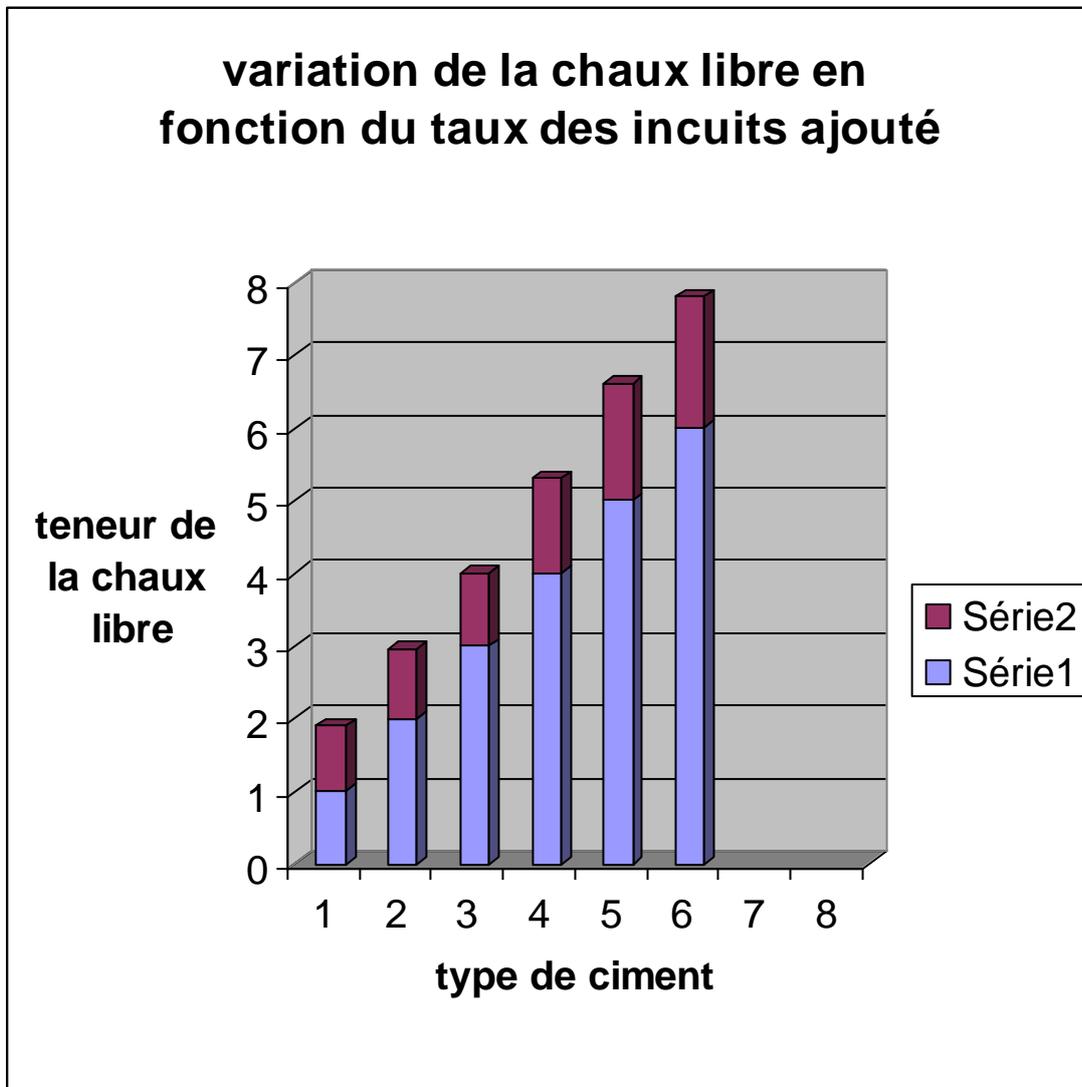
Perte au feu



Interprétation

La perte au feu augmente avec l'augmentation du taux des incuits, et cela explique l'augmentation de la chaux, ainsi la présence des impuretés dans les incuits qui ne subissent pas un cuisson optimale.

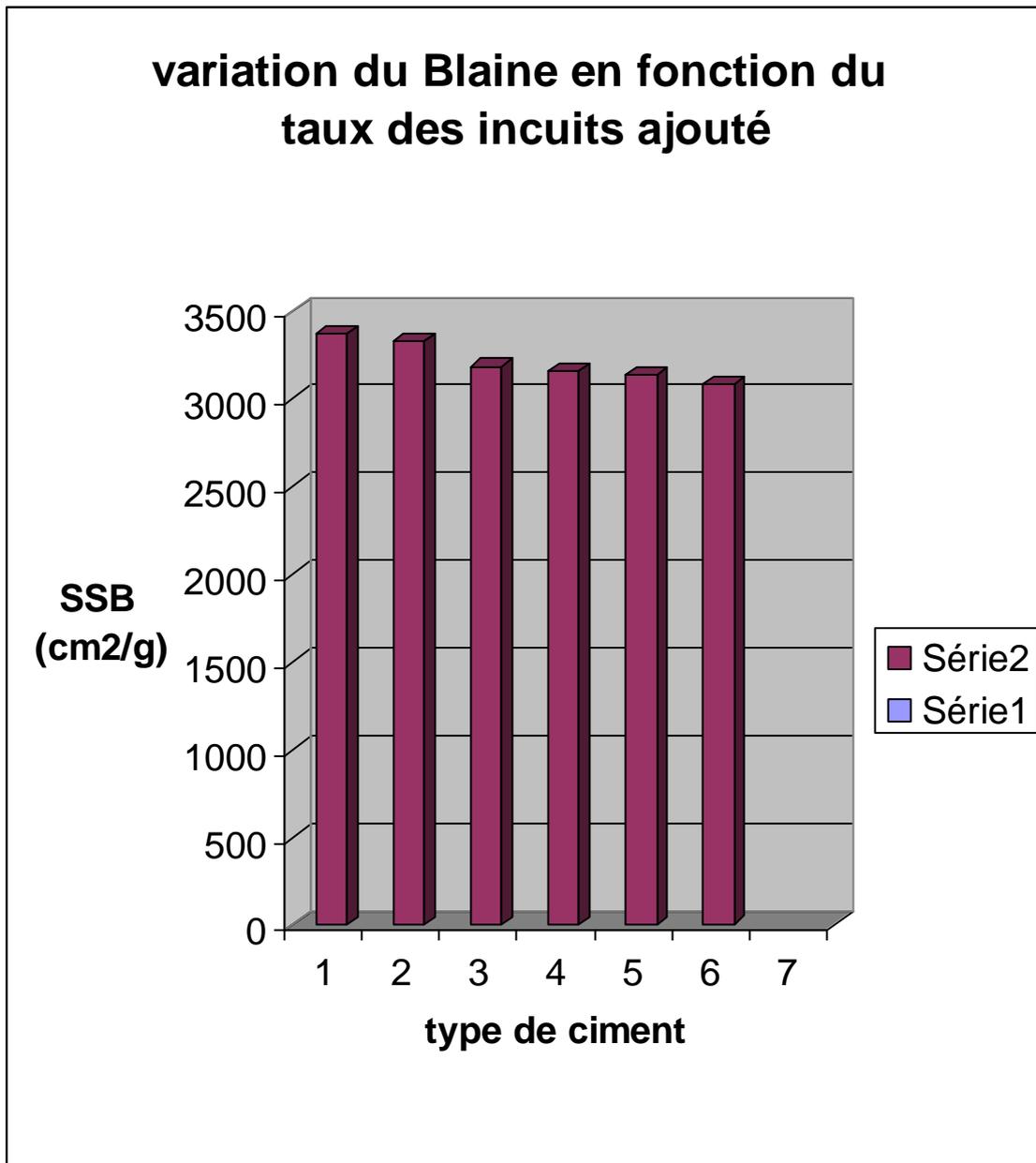
La Chaux libre



Interprétation

L'augmentation du taux des incuits influe directement sur le pourcentage de la chaux libre sur le ciment, puisque ce échantillon des incuits présent un chaux libre assez élevé qui dépasse 06pour cent.

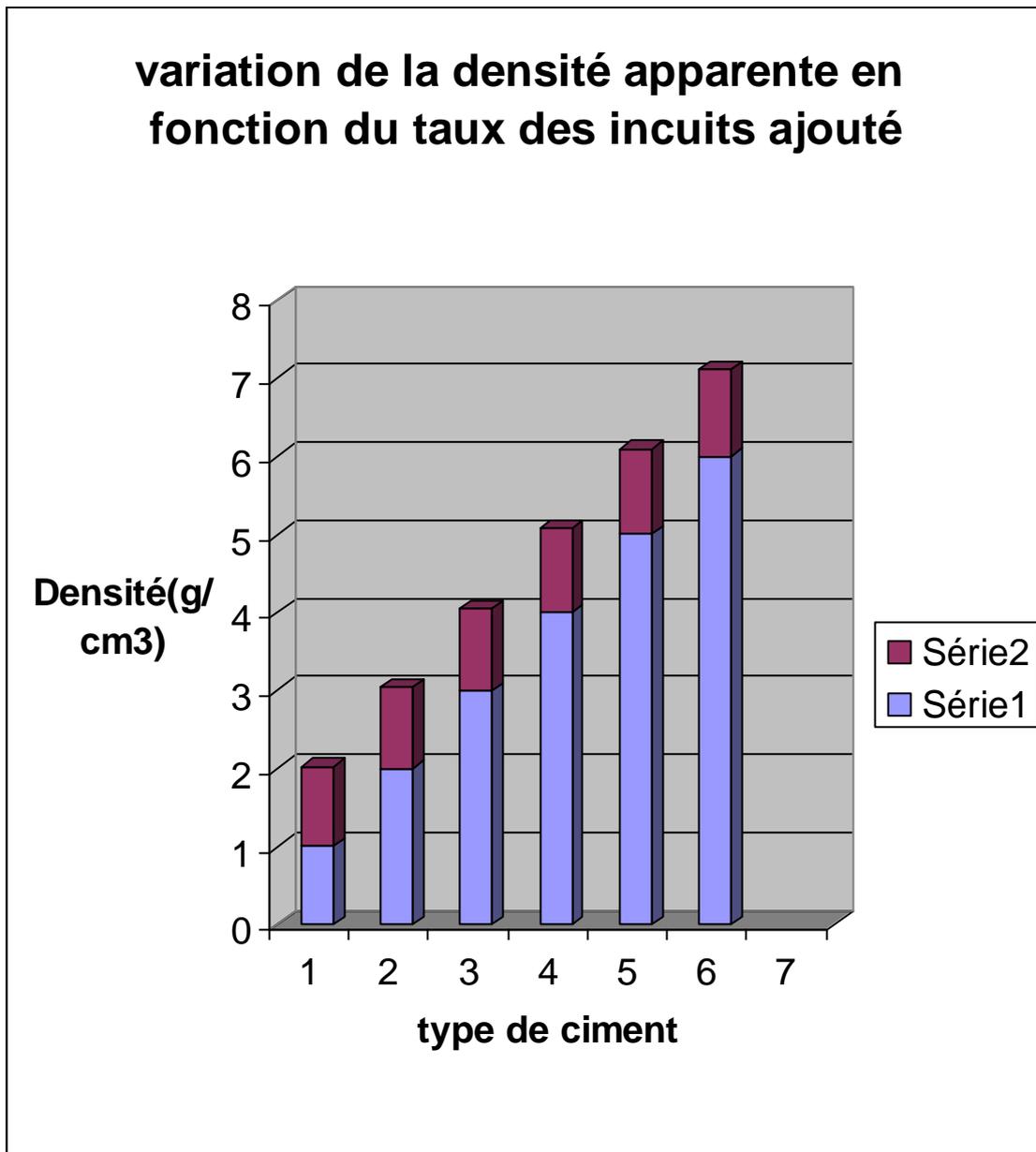
Surface Spécifique du Blaine "SSB"



Interprétation

L'introduction proportionnelle des incuits influe sur la finesse de ciment, c'est-à-dire la finesse diminue avec l'augmentation du taux d'incuit, puisque ce dernier présente des impuretés et de la poussière qui rendent le broyage difficile.

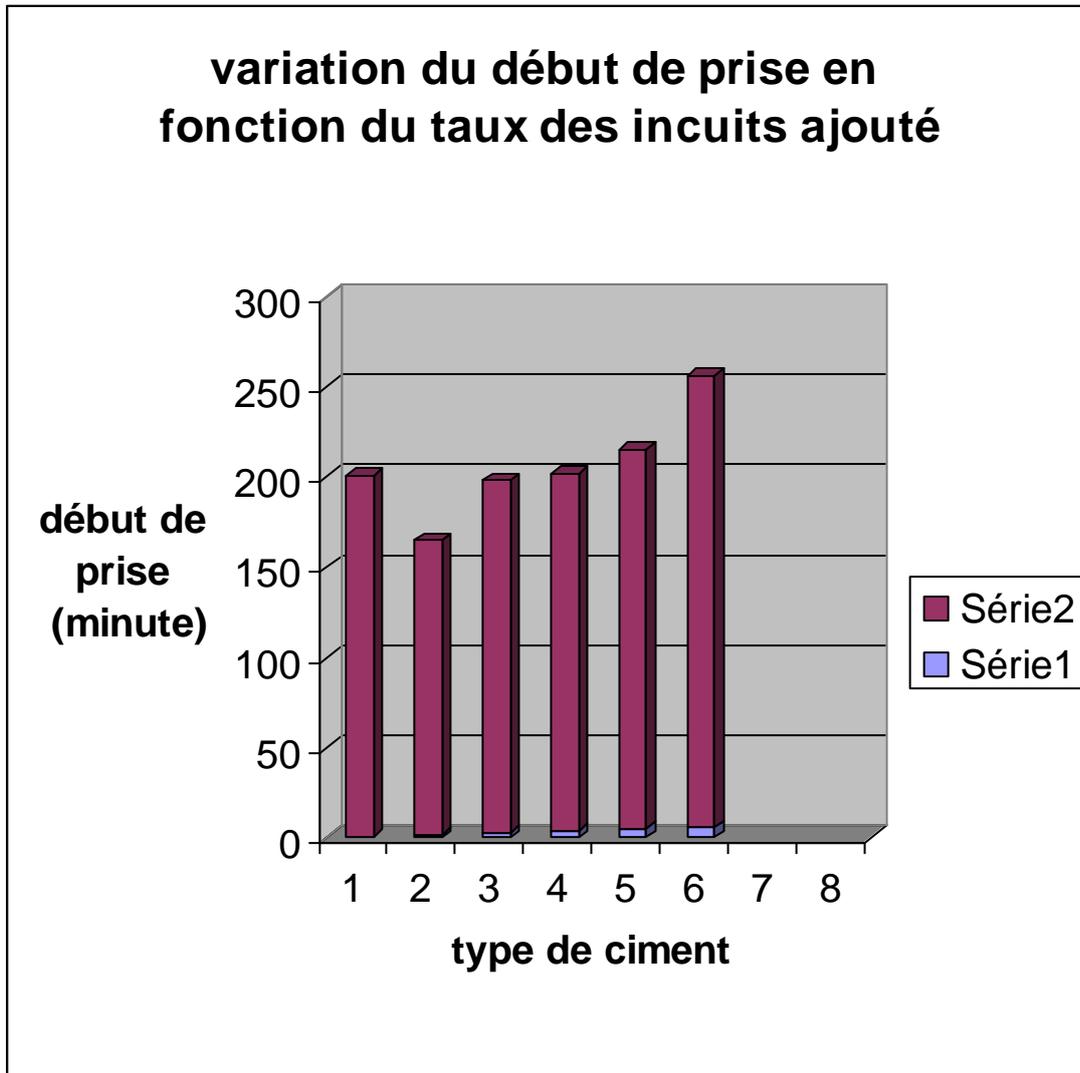
Densité apparente



Interprétation

Il existe une relation proportionnelle entre la densité apparente et le pourcentage des incuits ajouté, ce explique par conséquent la diminution du Blaine et l'augmentation du refus.

Début de prise

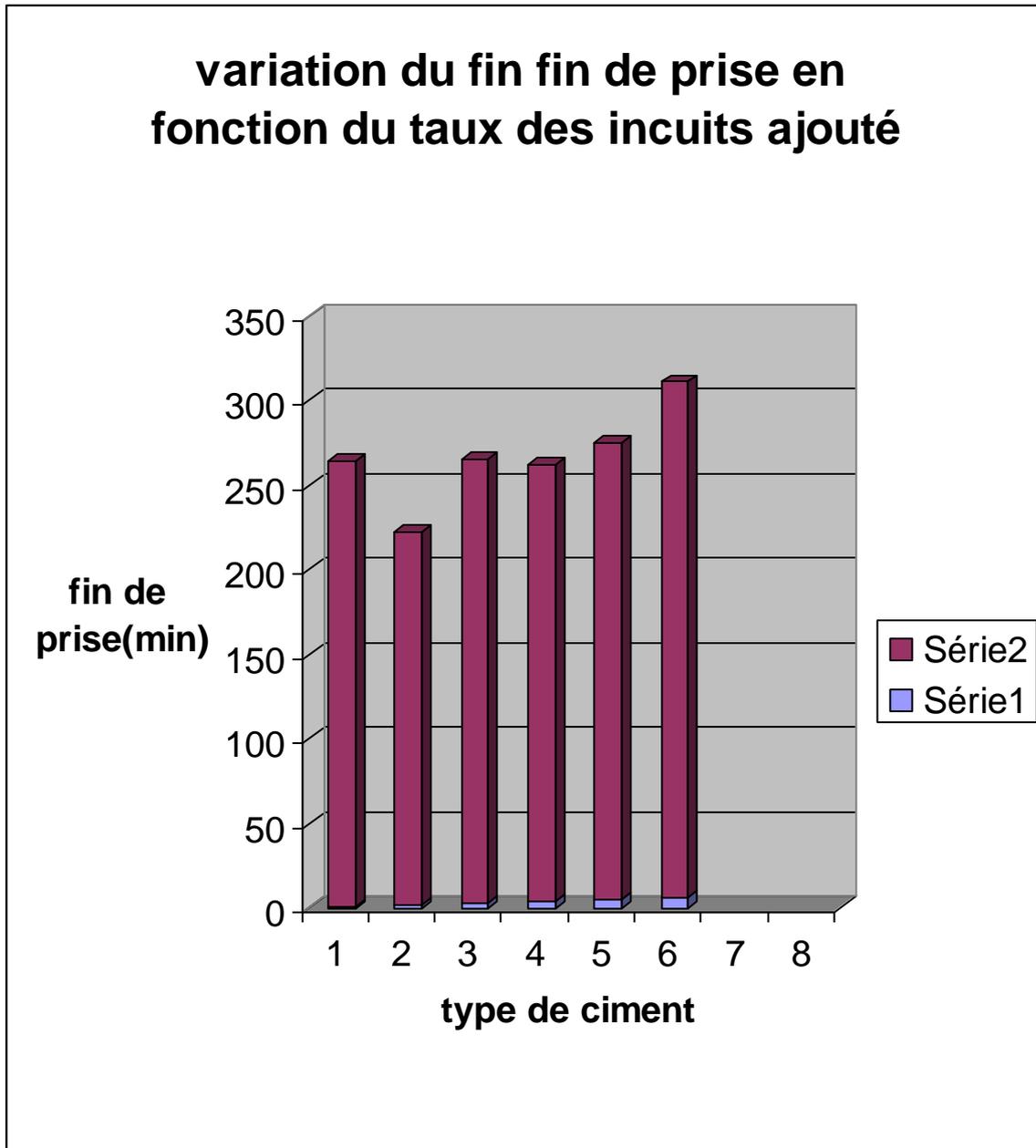


Interprétation

Il y'a une légère différence entre ces types de ciment, puisque il n'y a pas de changement sur la composition minéralogique du clincker et spécialement C3A responsable de la chaleur d'hydratation ainsi le début de prise, et aussi à la stabilité du pourcentage de gypse . En faite, tous les échantillons sont au dessus de la norme fixée à:

- *pour les ciments du classer 32.5MPA, début de prise \geq 90minutes
- 60 minutes \geq *pour les ciment du classe 42.5 et 52.5 MPA, début de prise

Fin de prise

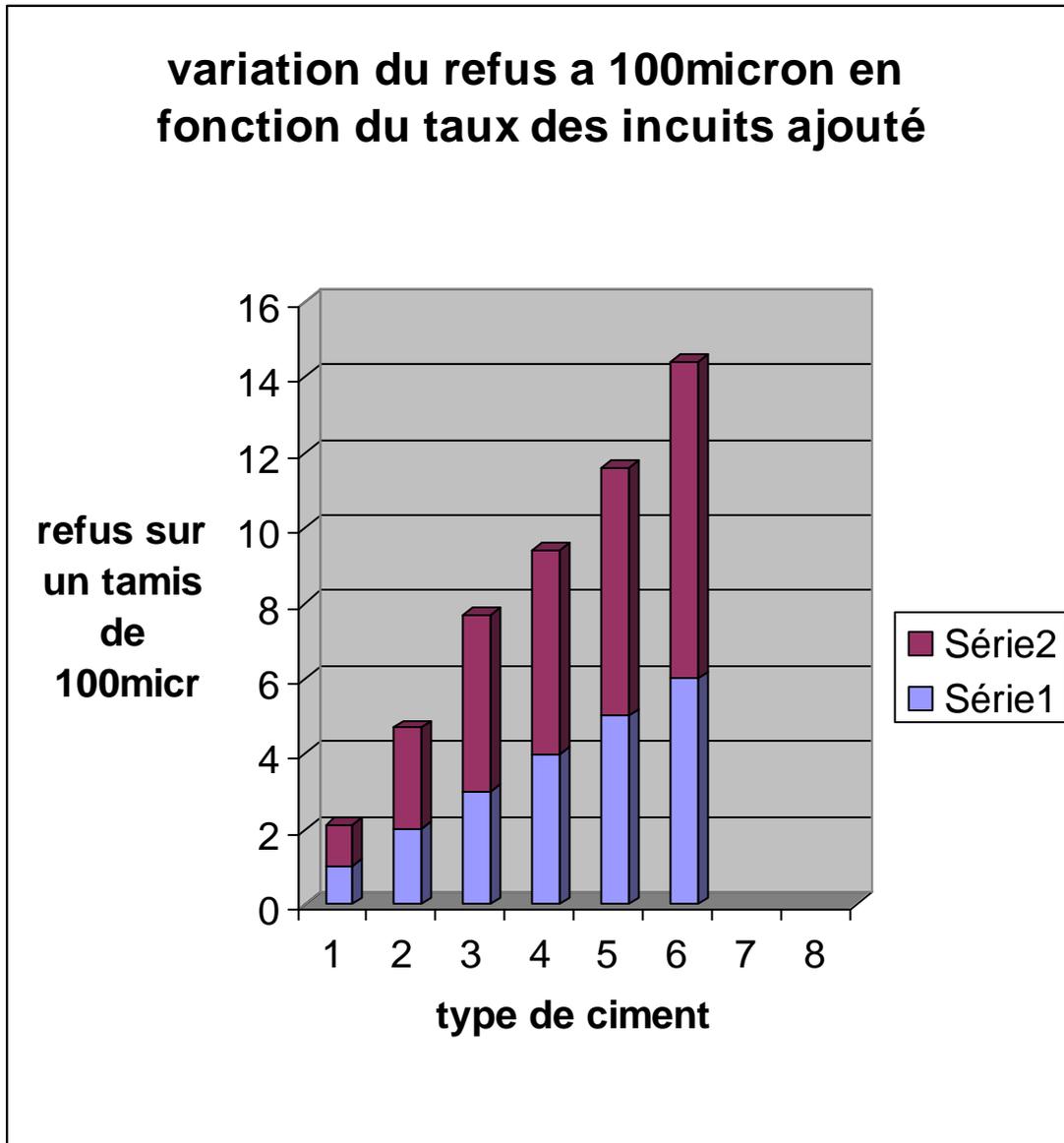


Interprétation

Les échantillons préparés répondent aux normes vis-à-vis ce paramètre de fin de prise

Norme: fin de prise < 10 heures

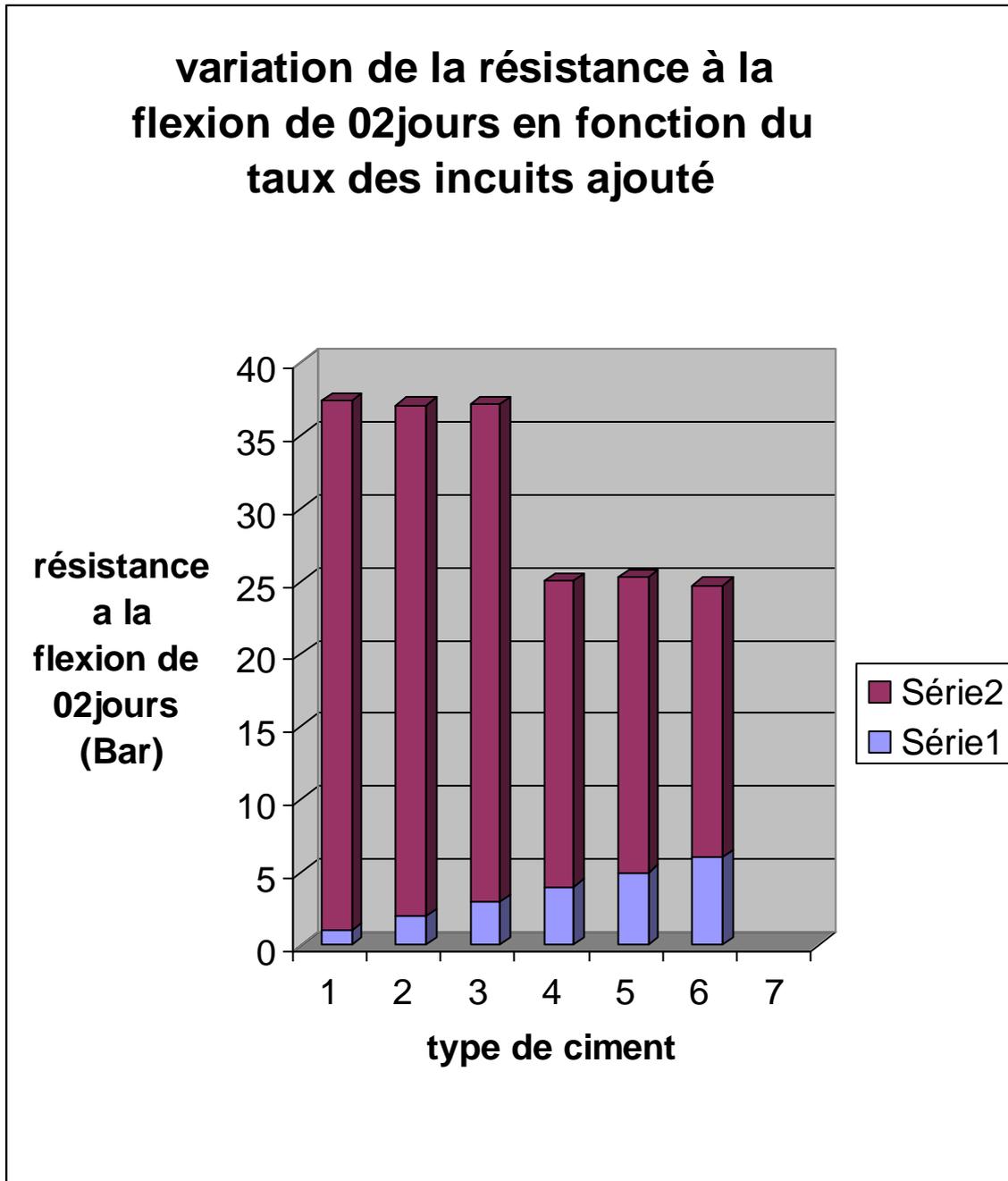
Refus



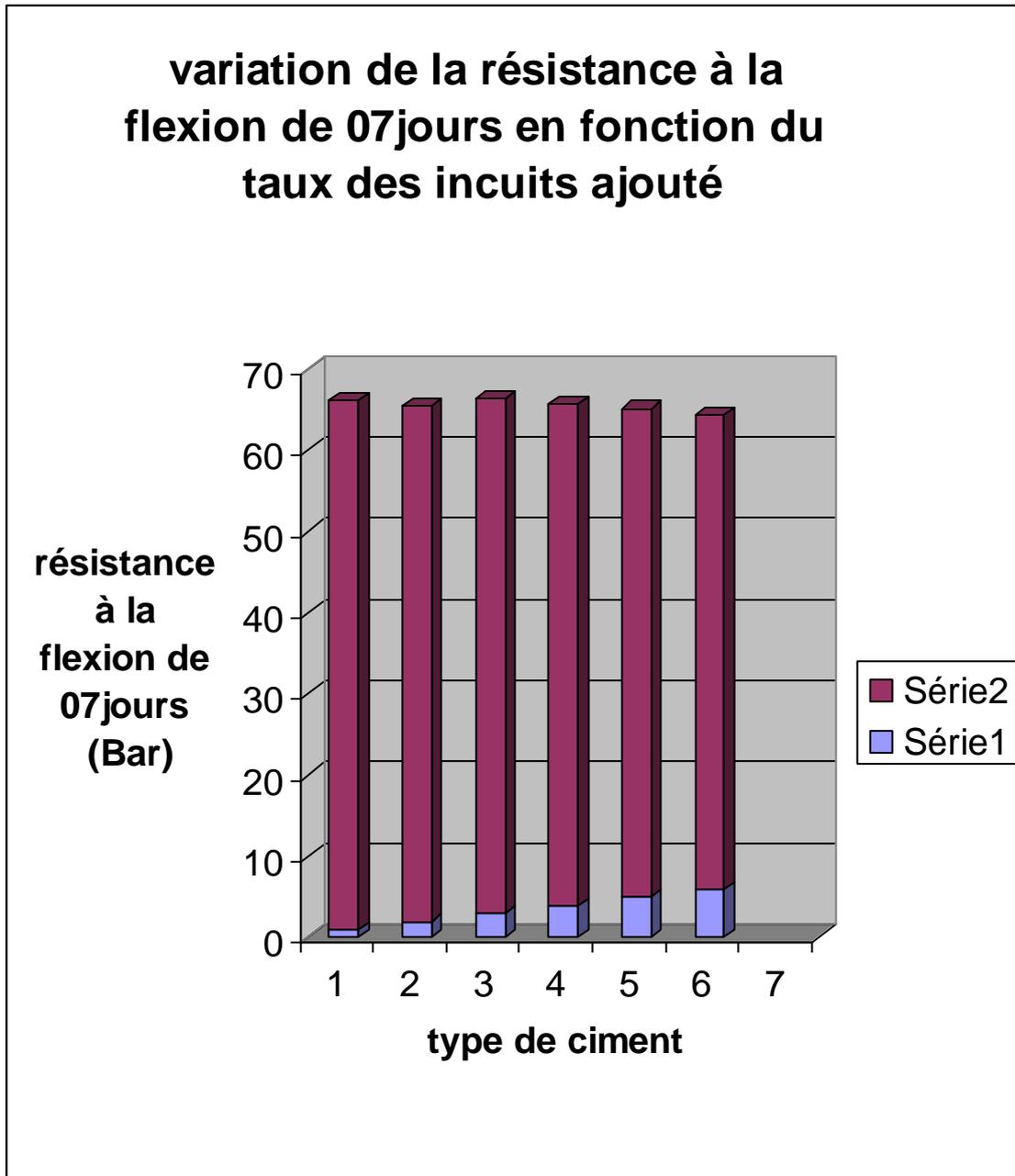
Interprétation

L'augmentation de refus sur un tamis de 100micr est flagrante pour ces types de ciment, et cela est dû au taux des incuits ajouté qui rend le broyage difficile, et qui par conséquent augmente la densité de ciment.

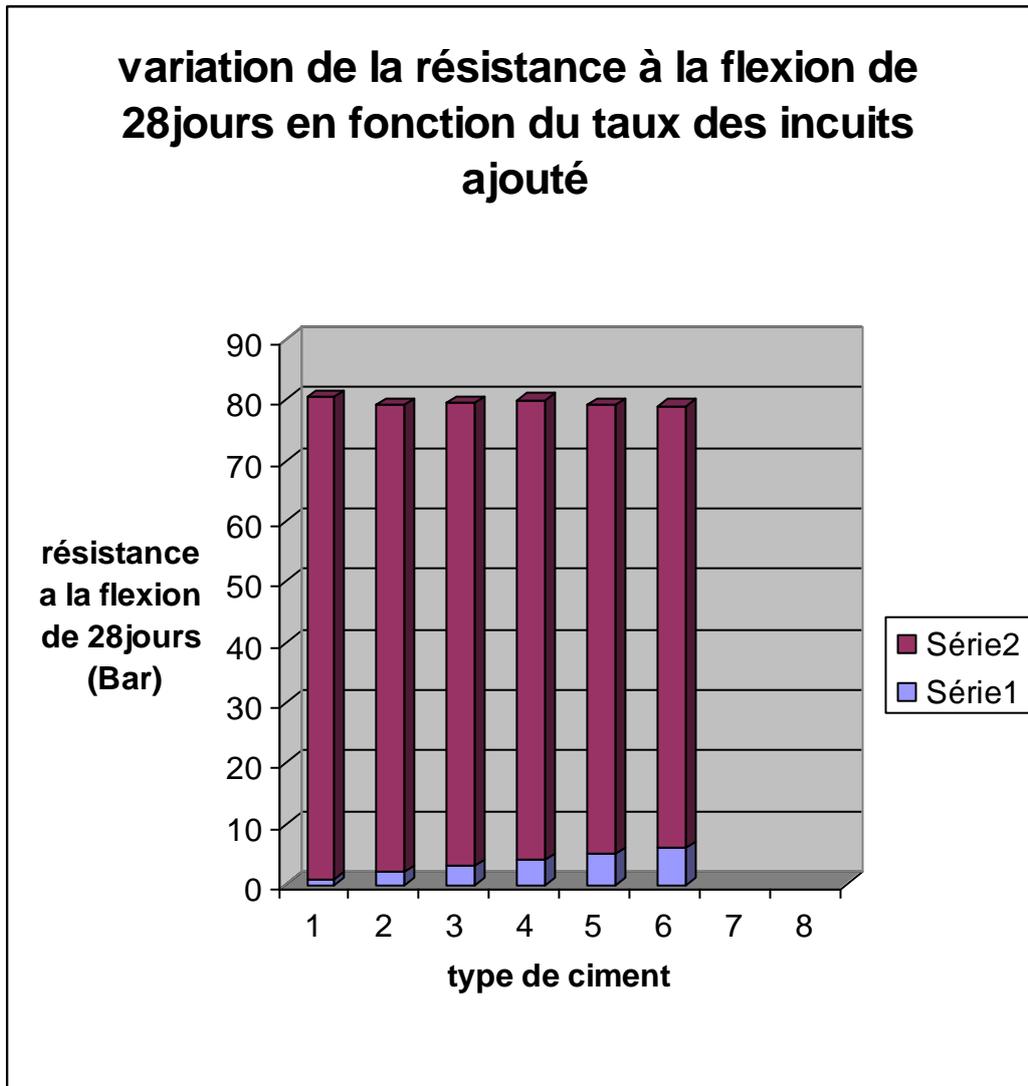
Résistance à la flexion de 02jours



Résistance à la flexion de 07jours



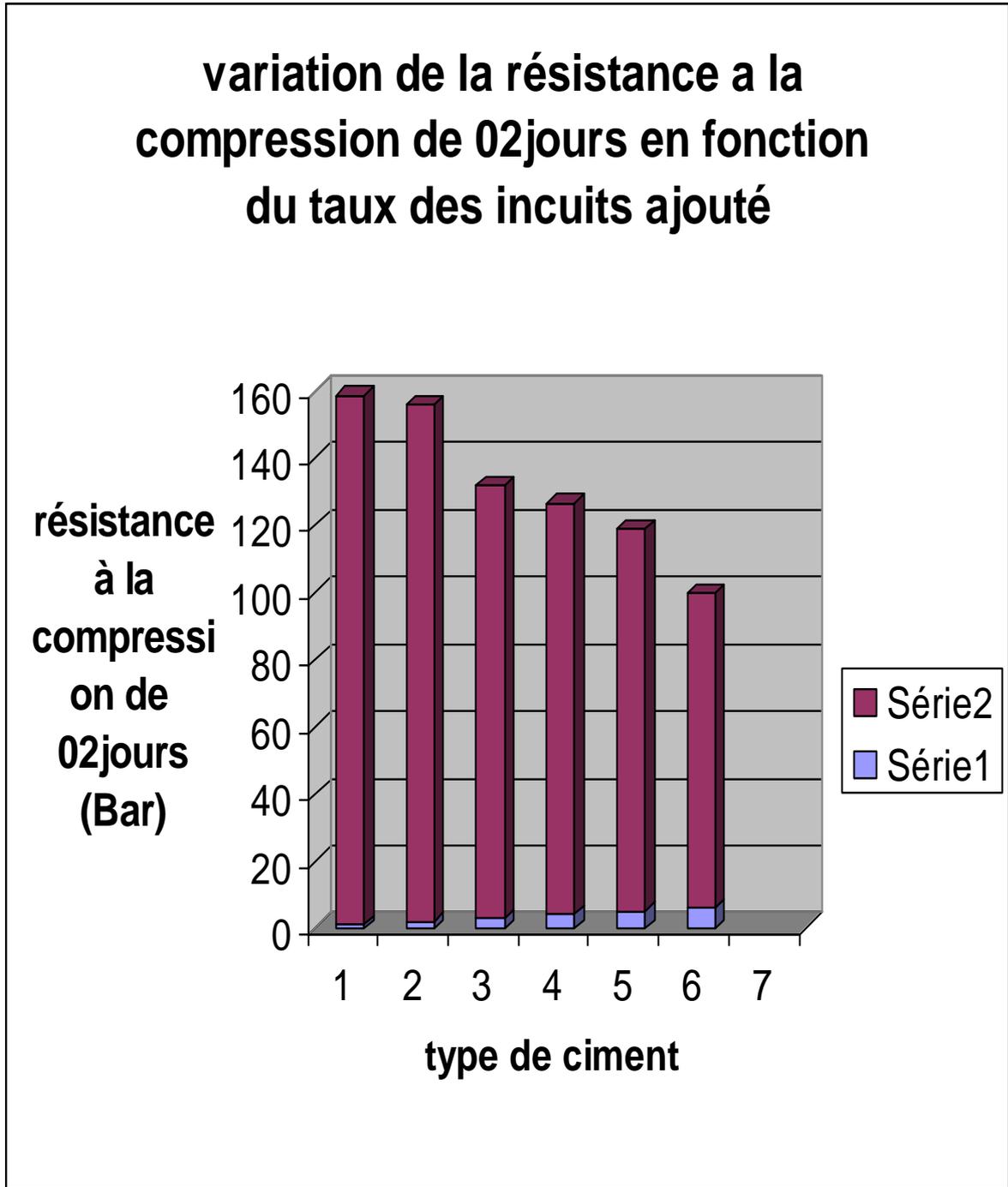
Résistance à la flexion de 28jours



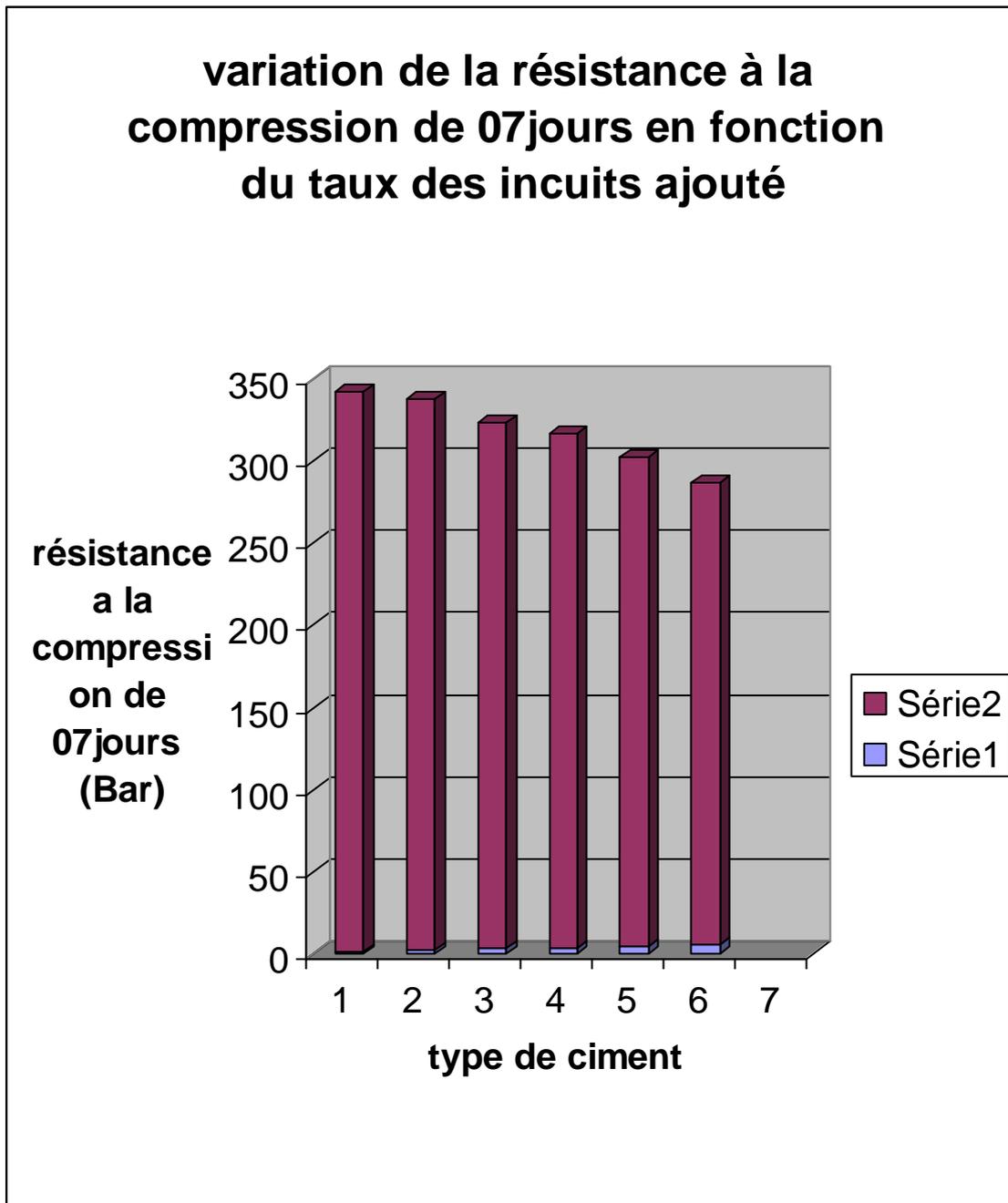
Interprétation

L'addition des incuits engendre une diminution nette de la résistance à la flexion aux différents ages, puisque ces incuits sont considérés comme ajouts au ciment, et ce paramètre de flexion n'est pas normalisé.

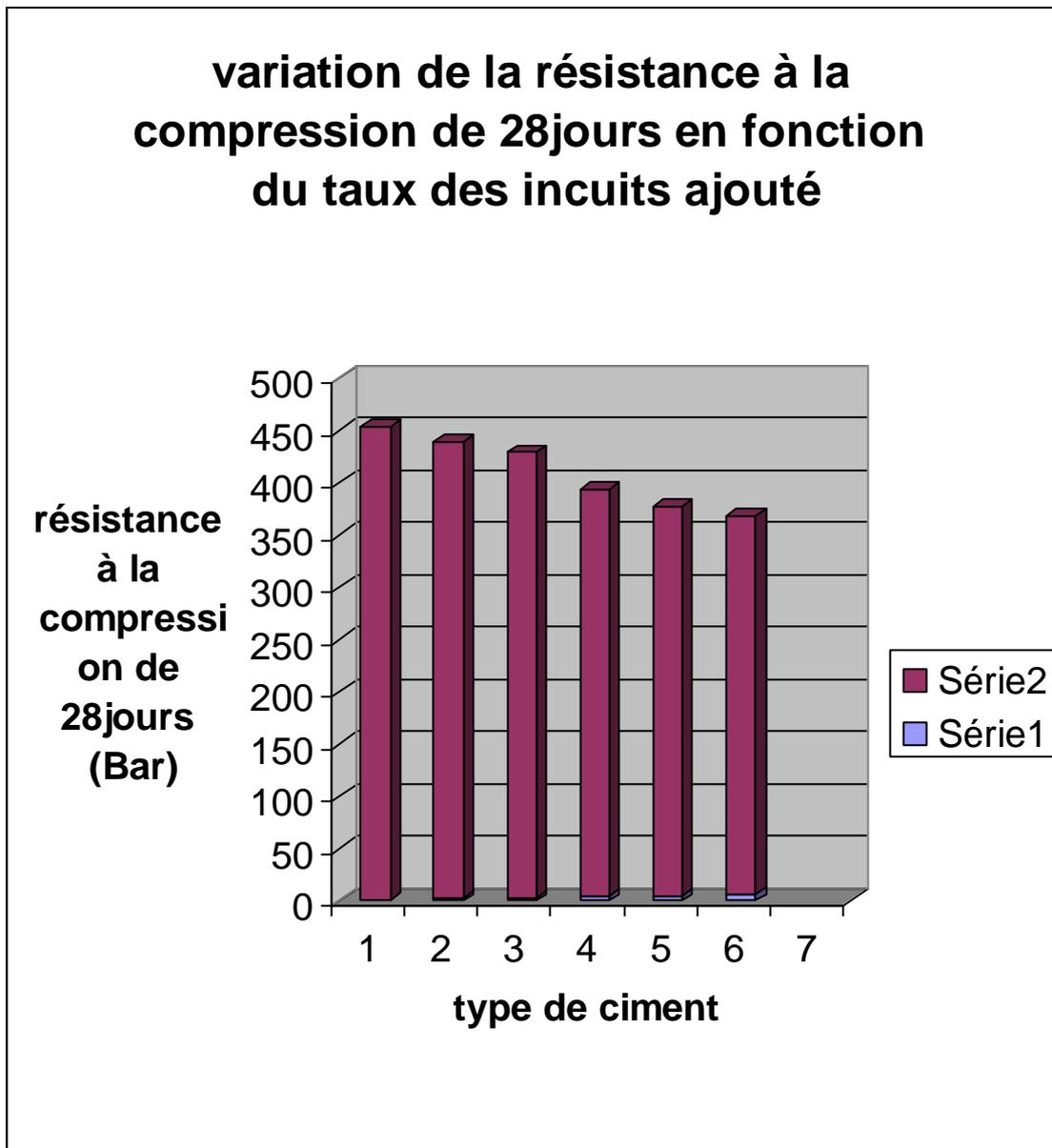
Résistance à la compression de 02jours



Résistance à la compression de 07jours



Résistance à la compression de 28jours



Interprétation

Les résultats d'analyses de la résistance à la compression de 02jours, nous donne une vision préliminaire sur le taux d'incuits optimale dans le ciment.

En faite, on constate que les résistances à la compression diminuent avec l'augmentation des incuits.

CONCLUSION

Conclusion

Notre étude nous a permis de bien découvrir le domaine de ciment, qui représente aujourd'hui l'un des industries les plus importantes en Algérie après les hydrocarbures.

L'étude d'optimisation du taux des incuits pour leur introduction dans le broyeur ciment dans la cimenterie, est une opération très importante surtout avec les problèmes technique rencontrés sur site tels que l'extraction du clincker dans les bulls et le grand problème de température élevé dans les broyeurs ciments a cause de l'introduction du clincker très chaud avec température qui dépasse parfois 100°C.

D'après les résultats d'analyses trouvés, on a déduit les points suivants:

- * le taux des incuits introduit est limité a 10 pour cent pour le type de ciment CPJ CEM II A/42.5

- * l'introduction des incuits jusqu'à 25 pour cent ne pose aucun problème pour la fabrication du ciment d'une classe de résistance inférieur 32.5MPA

- * l'obtention d'un ciment d'une classe 42.5MPA avec un taux des incuits de 10 pour cent est conditionnée avec une qualité du clincker produit supérieur avec un C3S qui dépasse 56 pour cent.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [1] : **Nicolas BUR** ; « Etude des caractéristique physico-chimique de nouveaux bétons éco-respectueux pour leur résistance à l'environnement dans le cadre du développement durable » »; thèse du doctorat; Université de Strasbourg Discipline, 5 septembre 2012.
- [2] : **Ben inak Chouaib Amine**, « processus de fabrication du ciment, et gestion des poussière »Mimoire fin étude, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014
- [3] : **C. Avenier**, B. Rosier, D. Sommain; Ciment naturel; Grenoble, Glénat éd. ISBN10 : 2723461580, 176 p ; 2007.
- [4] : **S. Catinaud**; « Durabilité à long terme de matériaux cimentaire, avec ou sans fillers calcaires, en contact avec des solutions salines »; thèse du doctorat; Université de LAVAL Canada; décembre 2000.
- [5] : **BENGUEDOUAR AFEFF** ; « SYNTHÈSE ET CARACTÉRISATION DE SILICATES DE CALCIUM HYDRATES (C.S.H) HYBRIDES », Mémoire Magister en chimie, UNIVERSITE DE YAOUNDE I ,2013
- [6] : Le Centre d'information sur l'eau Paris France; 2009.
- [7] : **J. Beauchamp**; **Mécanique des roches et des sols**; Cours en ligne; Université de Picardie Jules Verne; septembre 2003.
- [8] : **Renald L.Boneutz**, Margareth Carruther Richard efthim, roches et minéraux du mode, de la chaux et Nestlé 2005,360 pages (traduction de l'ouvrage anglo- saxon, publié par dorling Kindersley limited, London 2005), en par ti culier P212 à p203.
- [9] : **R. Chihaoui, H. Khelafi, M. Mouli, Y. Senhadji** ; « EFFETS DE LA POZZOLANE NATURELLE SUR LA DURABILITÉ DES MORTIERS EXPOSÉS AUX ATTAQUES SULFATIQUES »; Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Oran (Algeria) - October 12-14, 2009
- [10] : **Fathi habashi** (1994) « Bayer s' procès for aluminium production, a historical perspective, cahiers d'histoire de l'aluminium, N°13 HIVER 1993-1994, page 21.
- [11] : **Kaid N**; « Contribution à l'étude des caractéristiques physico-chimiques des mortiers pouzzolaniques », Mémoire de magistère en génie civil, USTMB d'Oran, Algérie , 2000
- [12] : **Jean- Paul Kurtz**, dictionary of civil engineering s science Springer Science 8 Business, media, 2004.
- [13] : **Hamami A.E.** ; «Vers une prédiction de la perméabilité au gaz à partir de la composition des matériaux cimentaires», Thèse de doctorat de l'Université de La Rochelle, France, 2009
- [14] : **Mr. BESSENOUCI Mohammed Zakaria** ; « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolaniques dans l'habitat », Mémoire de magister en PHYSIQUE, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID TLEMEN, 2009/2010.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIE

- [15] : **TCHAKOUTE KOUAMO Hervé** ; « Elaboration et caractérisation de ciments Géopolymères à base de scories volcaniques » Thèse de doctorat en Chimie Inorganique, UNIVERSITE DE YAOUNDE I, 08 Mai 2013
- [16] : **Mr BELLIFA Soufyane** ; « EVOLUTION DE LA POROMETRIE DES PATES AUTOPLAÇANTES », UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMEN, MAGISTER EN GENIE CIVIL, 15/03/2012
- [17] : **Mr. BESSENOUCI Mohammed Zakaria** ; « Impact et contribution thermo énergétique des matériaux de construction à base pouzzolaniques dans l’habitat », Mémoire de magister en Matériaux et énergies renouvelables, UNIVERSITE ABOU BAKR BELKAID TLEMEN, 2009/2010.
- [18] : **Mouna BOUHIDEL épouse MEKAHLI** ; « APPLICATION D’ANALYSE DU CYCLE DE VIE(ACV) POUR UN DEVELOPPEMENT DURABLE : CAS DES CIMENTERIES ALGERIENNES », Mémoire de magister en HYGIENE ET SECURITE INDUSTRIELLE, UNIVERSITE EL-HADJ LAKHDAR BATNNA, 2009
- [19] : **Cyril Guérandel** ; « Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de la lixiviation », THESE de Doctorat en Chimie analytique, l’Université Paul Verlaine – Metz, 23 Novembre 2009
- [20] : **Elodie Romilliat** ; « Etude des modes d’action d’agents de mouture sur le broyage du clinker », THESE de Doctorat en Génie des Procédés Université Jean Monnet de Saint-Etienne, le 20 janvier 2006.
- [21] : **B. Bounabe Ayache**; « Automatisation du stackeur et le moteur four; Rapport de stage à ERCE et SCHB ; Université de Paul Cézanne Aix Marseille 3;
- [22] : **Laib M & Merouani A** ; « Gestion et modes de traitement des différents types de déchets (gazeux, solide, liquide) générés par le processus de production dans la cimenterie de Hamma Bouziane. » Mémoire de fin d’étude, Université Mentouri de Constantine. 2011
- [23] : **ABDERRAHIM Omar** ; « ETUDE DE L’EXTRACTION LIQUIDE-SOLIDE DE DIFFERENTS METAUX PAR DES RESINES IMPREGNEES DE D2EHPA/TOPO ET PAR L’ACIDE POLYETHYLENIMINEMETHYLENE PHOSPHONIQUE. ETUDE COMPARATIVE. » THESE de Doctorat en Chimie, L’UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID- TLEMEN, le 20/12/2006
- [24] : **Paul Pascal**, nouveau traité de chimie minérale, paris Masson, 1956 (rein Pr- 1966) 32 VOL.

ANNEXE I

ANNEXE I :

Complexométrie: Détermination du titre de chaque oxyde.

L'ionogramme de la solution EDTA (Acide Éthylène Diamine tétraacétique ou sel disodique $C_{10}H_{10}N_2NA_2O_8 \cdot 2H_2O$) réagit dans tous les cas, avec ion-gramme du métal sans tenir compte de la valence.

Par exemple:

Une solution EDTA à 0.1M = 0.1 mol/l $\approx 0,1 \times 372,24$ g/l

Donc une solution EDTA 0.1 M correspond à une solution contenant 37.224 g/l ; ce qui signifie que:

1 ml de cette solution contient $37.224 \cdot 10^{-3}$ g d'EDTA.

Comme : 372.24 g réagit avec 40g de Ca.

$$37.224 \cdot 10^{-3} \text{ g réagit avec } X \text{ g de Ca.}$$

$$\text{Donc: } X = (37.224 \cdot 10^{-3} \cdot 40) / 372.24$$

$$X = 40 \cdot 10^{-4} \text{ g de Ca.}$$

Et 56g de CaO réagit avec: 40g de Ca.

$$40 \cdot 10^{-4} \text{ g de Ca réagit avec } Y \text{ g de CaO}$$

$$\text{Donc : } Y = (56 \cdot 40 \cdot 10^{-4}) / 40$$

$$Y = 56 \cdot 10^{-4} \text{ g de CaO.}$$

Ainsi : on a montré par les calculs que 1 ml de solution EDTA 0.1M réagit avec 0.0056g de CaO.

Dans les analyses de ciment, on a utilisé une solution de EDTA plus faible, de façon que :

1 ml de solution EDTA réagit avec 0.002g de CaO.

On essaye de refaire le calcul pour remonter à la concentration de ladite solution d'EDTA.

La concentration de cette solution sera donc :

0.0056 g de CaO contient 0.0040 g de Ca

0.002 g de Ca contient Z

$$Z = (0.002 \cdot 0.004) / 0.0056 = 0.1428 \cdot 10^{-2} \text{ g de Ca.}$$

LES ANNEX

Comme :

$3772.24 \cdot 10^{-4}$ g EDTA réagit avec $40 \cdot 10^{-4}$ g de Ca.

V réagit avec $14.28 \cdot 10^{-4}$ de Ca

$$V = (372.24 \cdot 10^{-4} \cdot 14.28 \cdot 10^{-4}) / 40 \cdot 10^{-4} = 132.89 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

Donc : 1 ml de cette solution contient $132.89 \cdot 10^{-4}$ g = 13.289 mg.

Calculons les quantités des différents oxydes qui correspondent à 1 ml de cette solution d'EDTA :

Pour CaO :

1 ml de cette solution correspond à 0.002 g de CaO.

Pour Al₂O₃: ($M_{Al} = 27$; $M_O = 16$; $M_{Al_2O_3} = 102$ g/mol).

372.24 g d'EDTA \longrightarrow 27 g de Al

$132.98 \cdot 10^{-4}$ \longrightarrow $X = (132.89 \cdot 10^{-4} \cdot 27) / 372.24$

$$X = 9.64 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

$$X = 0.00096 \text{ g de Al.}$$

Comme : 102 g de Al₂O₃ \longrightarrow 54 g de Al.

$X_{Al_2O_3}$ \longrightarrow 0.00096.

$$X_{Al_2O_3} = (102 \cdot 0.00096) / 54 = 0.00181 \text{ g de Al}_2\text{O}_3.$$

Pour Fe₂O₃: ($M_{Fe} = 55.85$; $M_{Fe_2O_3} = 159.7$ g/mol).

372.24 g d'EDTA \longrightarrow 55.85 de Fe.

$132.89 \cdot 10^{-4}$ \longrightarrow $X_{Fe} = (132.89 \cdot 10^{-4} \cdot 55.85) / 372.24$

$$= 0.00199 \text{ de Fe.}$$

Comme : 159.7 g de Fe₂O₃ \longrightarrow 111.7 g de Fe.

$X_{Fe_2O_3}$ \longrightarrow 0.00199

$$X_{Fe_2O_3} = (0.00199 \cdot 159.7) / 111.7$$

$$X_{Fe_2O_3} = 0.00285 \text{ g de Fe}_2\text{O}_3.$$

LES ANNEX

Pour MgO: ($M_{Mg} = 24.31 \text{ g}$; $M_{MgO} = 40.31 \text{ g/mol}$)

372.24 d'EDTA \longrightarrow 24.31 de Mg

$$\begin{aligned} 132.89 \cdot 10^{-4} &\longrightarrow X_{Mg} = (132.89 \cdot 10^{-4} \cdot 24.31) / 372.24 \\ &= 8.86 \cdot 10^{-4} \text{ g} \\ &= 0.00087 \text{ g de Mg.} \end{aligned}$$

Comme : 40.31 g de MgO \longrightarrow 24.31 g de Mg

X_{MgO} \longrightarrow 0.00087 g.

$$\begin{aligned} X_{MgO} &= (40.31 \cdot 0.00087) / 24.31 \\ &= 0.00144 \text{ g de MgO.} \end{aligned}$$

En Résumé :

1 ml de cette solution EDTA (13.289g/l) correspond à :

- 0.002 g = 2.00 mg de CaO.
- 0.00144 g = 1.44 mg de MgO.
- 0.00285 g = 2.85 mg de Fe_2O_3 .
- 0.00181 g = 1.81 mg de Al_2O_3 .

Calculs des titres de chaque oxyde :

Si : $T_{CaO} = \text{Titre} = 1 \longrightarrow$ Le volume de la solution EDTA est 60 ml nécessaire du dosage.

Si: $T_{CaO} \neq 1 \longrightarrow$ Le volume de la solution EDTA est V ml pour le dosage de CaO

On a: $1 \cdot 60 = T_{CaO} \cdot V \text{ ml}$ $T_{CaO} = 60 / V \text{ ml}$.

Ainsi:

- T_{CaO} (titre en CaO) = $60 / V \text{ ml}$.
- T_{MgO} (titre en MgO) = $(1.44 \cdot T_{CaO}) / 2 = 0.72 \cdot T_{CaO}$.
- $T_{Fe_2O_3}$ (titre en Fe_2O_3) = $(2.85 \cdot T_{CaO}) / 2 = 1.425 \cdot T_{CaO}$.
- $T_{Al_2O_3}$ (titre en Al_2O_3) = $(1.81 \cdot T_{CaO}) / 2 = 0.905 \cdot T_{CaO}$.

Donc le pourcentage des différents oxydes sont :

- ✓ % CaO = $T_{CaO} \cdot V_1$: Volume EDTA pour doser CaO.
- ✓ % MgO = $T_{MgO} \cdot (V_2 - V_1)$ avec V_2 : Volume EDTA pour doser MgO.
- ✓ % Fe_2O_3 = $T_{Fe_2O_3} \cdot V_3$ avec V_3 : Volume EDTA pour doser Fe_2O_3 .
- ✓ % Al_2O_3 = $T_{Al_2O_3} \cdot V_4$ avec V_4 : Volume EDTA pour doser Al_2O_3 .

ANNEXE II :

LES ANNEX

Tableau A2.1 : Valeurs de la résistance à la compression des classes de ciments.

Classe	Résistance à la compression (MPa)			
	Résistance au jeune âge		Résistance normal	
	2 jours	7 jours	28 jours	
32,5	/	/	> 32,5	< 52,5
32,5 R (*)	> 13,5	/		
42,5	> 12,5	/	>42,5	< 62,5
42,5 R (*)	> 20	/		
52,5	> 20	/	> 52,5	
52,5 R (*)	> 30			

(*) La lettre R indique que le ciment a une résistance élevée au jeune âge.

Tableau A2.2 : Temps de début de prise des ciments.

Classe	Temps de début de prise (min)
32,5	> 90
32,5 R	
42,5	> 60
42,5 R	
52,5	
52,5 R	

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION.....	2
CHAPITRE I : GÉNÉRALITÉ SUR LA FABRICATION DU CIMENT	
1-Historique et origine de ciment.....	4
2-Le ciment.....	4
3-Constituants de base du ciment	5
3.1. Matières premières.....	5
3.1.1. Calcaire.....	5
3.1.2. Argiles.....	6
3.1.3- Élément argileux calcaires.....	7
3.2. Matériaux de correction.....	7
3.2.1. Minerai de fer (Fe_2O_3).....	7
3.2.2. Le tuf	8
3.2.3. Le gypse	8
3.2.4. La bauxite	8
3.3 Les matières secondaires : Ajouts.....	9
3.3.1- La pouzzolane naturelle.....	9
3.3.2-Laitiers de hauts fourneaux.....	10
3.3.3- Les cendres volantes siliceuses (V) ou calciques (W)	10
3.3.4- Les Calcaires (L, LL)	10
3.3.5- Les schistes calcinés (T)	10
3.3.6-Les sulfates de calcium	11
3.3.7-Les fumées de silice (D)	11
3.4- Produit semi-fini.....	11
3.4.1-Le clinker.....	11
3.5-Les additifs	14
4-Processus de fabrication de ciment.....	14
4.1-Extraction.....	15
4.2-Concassage.....	16
4.3-Préparation du cru.....	19
4.4-Broyage du cru.....	19
4.5-Séparation.....	20
4.6- Homogénéisation.....	20
4.7-Zone de cuisson.....	20
4.8-Stockage du clinker.....	22
4.9- Broyage clinker.....	23
4.10- Stockage, ensachage et expédition.....	23
5- Différent types de ciments.....	24

TABLES DES MATIERES

CHAPITRE II :

CONTROLE DE QUALITE

1-Méthodes chimiques	27
1.1-Attaque par fusion alcaline	27
1.2. Attaque par acide perchlorique	28
1.2.1- Dosage pour la détermination des oxydes.....	29
1.2.1.1-Détermination de l'oxyde de calcium (CaO).....	29
1.2.1.2-Détermination de l'oxyde de magnésium (MgO).....	30
1.2.1.3-Détermination de l'oxyde de fer (Fe ₂ O ₃).....	30
1.2.1.4-Détermination de l'oxyde de l'alumine (Al ₂ O ₃).....	31
1.2.2-Détermination de la silice (SiO ₂).....	31
1.2.3-Détermination de la chaux libre (CaO _L).....	32
1.2.4-Détermination de la perte au feu (PAF).....	32
1.2.5-Détermination du pourcentage de SO ₃	32
1.2.6-Détermination des résidus insolubles.....	33
1.2.7-Détermination de la teneur des alcalins (K ₂ O et Na ₂ O).....	34
1.2.8-Détermination du pourcentage de l'ajout pouzzolane dans le ciment	34
2-Méthodes physiques	37
2.1-Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine	37
2.2- Mesure de la densité	40
2.3-Détermination du pourcentage des refus	40
2.4-La consistance normale	42
2.4.1-Définition.....	42
2.4.2-Pâte normale	42
2.4.3-Préparation de la pâte.....	43
2.4.4-Vérification de la consistance normale.....	43
2.5-Essais de prise	43
2.5.1-Début de prise.....	45
2.5.2-Fin de prise.....	45
2.6-Essai d'expansion	45
2.7-Essais mécaniques (flexion –compression)	46

CHAPITRE III : PREPARATION DES ECHANTILLONS ET ANALYSE DES RESULTATS D'ESSAIS

1-prélèvement des échantillons	52
2-Séchage des échantillons	52
3-Broyage	52
4-pesage et répartition des échantillons	52

TABLES DES MATIERES

CONCLUSION.....	71
REFERENCE BIBLIOGRAPHIE.....	73

LES ANNEX

ANAXE I.....	76
--------------	----

LISTE DES NOTATION

- C₃S** : Silicate tricalcique dénommé (alite), sa formule chimique est $3\text{CaO}, \text{SiO}_2$.
- C₂S** : Silicate bi-calcique ou (bélite), sa formule chimique est $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$.
- C₃A** : Aluminates tricalciques ou (célite), sa formule chimique est $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$.
- C₄AF** : Ferro-aluminates tétra-calcique, de formule chimique est $4\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$.
- L** : Les calcaires à 0.50% en masse de carbone organique.
- LL** : Les calcaires à 0.50% en masse de carbone organique.
- T** : Les schistes calcinés.
- D** : les fumées de Silice.
- H** : H_2O
- C** : CaO
- PAF** : Perte au feu.
- PZ** : Pouzzolane naturelle.
- TA** : Titre Alcalimétrie.
- TAC** : Titre Alcalimétrie complet.
- TH** : Dureté totale.
- TCa** : Dureté calcique (Ca^{II} en mg/L).
- TMg** : Dureté magnésique (Mg^{II} en mg/L).
- RI** : Résidus insolubles.
- E/C** : Le rapport (eau/ ciment).
- Ri** : Pourcentage des refus cumulés.
- Ti** : Pourcentage des tamisats cumulés.
- PZ** : Pouzzolane naturelle.

TABLES DES MATIERES

- SSB** : Surface spécifique Blaine.
- EDX** : Spectromètre à dispersion d'énergie des rayons X.
- Mc** : Masse des refus cumulés (g)
- T** : Température.
- NA** : Normes algériennes.
- NF** : Normes françaises
- MEB** : Microscope électronique à balayage.
- NTU** : Unité de Turbidité Néphalométriques (UTN) en anglais Nephelometric Turbidity Unit.

FIGURES

- FIGURE 1.1** : Grain de gypse.
- FIGURE 1.2** : Grains de pouzzolane.
- FIGURE 1.3** : Composition chimique du clinker.
- FIGURE 1.4** : Image d'une section polie d'un clinker réalisée au Microscope Electronique à Balayage en électrons rétrodiffusés
- FIGURE 1.5** : Schéma de la fabrication du ciment (source Ciments Calcia).
- FIGURE 1.6** : Carrière d'extraction d'argile et de calcaire
- FIGURE 1.7** : Concassage des matières premières au niveau de la carrière.
- FIGURE 1.8** : Camion de transport de la carrière
- FIGURE 1.9** : Transporteurs mécaniques et pneumatiques
- FIGURE 1.10** : Hall de pré-homogénéisation.
- FIGURE 1.11** : Broyeur
- FIGURE 1.12** : Le four rotatif.
- FIGURE 1.13** ; Schéma d'un four rotatif de cimenterie.
- FIGURE 1.14** : Les bulles de stockage du clinker de la cimenterie de Béni-Saf.
- FIGURE 1.15** : Broyeur cuit.
- FIGURE 1.16** : Silos de stockage de ciment.
- FIGURE 1.17** : Expédition.
- FIGURE II.1** : Perleuse
- FIGURE II.2** : Pastilleuse.
- FIGURE II.3** : Analyseur RX.
- FIGURE II.4** : Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine.
- FIGURE II.5** : L'entonnoir.

TABLES DES MATIERES

- FIGURE II.6** : les tamis de 90 μ et de 45 μ .
- FIGURE II.7** : L'appareil Alpine.
- FIGURE II.8** : Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance
- FIGURE II.9** : Le malaxeur.
- FIGURE II.10** : Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible.
- FIGURE II.11** : Prismètre automatique multipostes.
- FIGURE II.12** : Aiguille de châtelier.
- FIGURE II.13** Essai de stabilité avec l'appareil de chatelier
- FIGURE II.14** Chambre humide
- FIGURE II.15** Malaxeur automatique.
- FIGURE II.16** Moules pour moulage des éprouvettes de mortier
- FIGURE II.17** Appareil choc.
- FIGURE II.18** Appareil de flexion.
- FIGURE II.19** Appareil de compression.
- FIGURE II.20** La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément.
- FIGURE II.21** Les demi-prismes de l'éprouvette obtenue après rupture en flexion seront rompus en compression

TABLEUX

- Tableau I.1** : Composition chimique élémentaire de la pouzzolane naturelle de Béni-Saf.
- Tableau I.2** : Caractéristiques chimiques du laitier
- Tableau I.3** : Caractéristiques chimiques de la fumée de silice.
- Tableau I.4** : les types des différents ciments avec leurs compositions correspondantes
- Tableau III.1** : Analyse chimique de Chrome en %
- Tableau III.2** : Analyse chimique des échantillons (CPA) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.3** : Analyse chimique des échantillons (CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.4** : Analyse chimique des échantillons(CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.5** : Analyse chimique des échantillons(CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.6** : Surface spécifique Blaine des échantillons(CPA) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.7** : Surface spécifique Blaine des échantillons(CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.8** : Refus des échantillons(CPA) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.9** : Refus des échantillons(CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.10** : Densité apparente des échantillons(CPA) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.11** : Densité apparente des échantillons(CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.12** : Expansion à chaud des échantillons(CPA) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.13** : Expansion à chaud des échantillons(CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III I.14:** Résultats des essais sur la pâte pure des échantillons(CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).

TABLES DES MATIERES

- Tableau III.15 :** Résultats des essais sur la pâte pure des échantillons(CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.16 :** Résistance à la flexion en MPa des échantillons (CPA) à différents pourcentage en Chrome (Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.17 :** Résistance à la flexion en MPa des échantillons (CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.18 :** Résistance à la compression en MPa des échantillons (CPA) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.19 :** Résistance à la compression en MPa des échantillons (CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn).
- Tableau III.20 :** ΔM des échantillons (CPA) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn) en (g).
- Tableau III.21 :** ΔM des échantillons (CPJ) à différents pourcentage en Chrome(Cr) et Zinc (Zn) en (g).
- Tableau III.22 :** Comparaison de résistance à la flexion à l'âge de 28 jours des échantillons (CPA) à différents pourcentage en Chrome (Cr) et Zinc (Zn) dans l'eau et les acides H_2SO_4 et $HClO_4$ en (MPa).
- Tableau III.23 :** Comparaison de résistance à la flexion à l'âge de 28 jours des échantillons (CPJ) à différents pourcentage en Chrome (Cr) et Zinc (Zn) dans l'eau et les acides H_2SO_4 et $HClO_4$ en (MPa).
- Tableau III.24 :** Comparaison de résistance à la compression à l'âge de 28 jours des échantillons (CPA) à différents pourcentage en Chrome (Cr) et Zinc (Zn) dans l'eau et les acides H_2SO_4 et $HClO_4$ en (MPa).
- Tableau III.25 :** Comparaison de résistance à la compression à l'âge de 28 jours des échantillons (CPJ) à différents pourcentage en Chrome (Cr) et Zinc (Zn) dans l'eau et les acides H_2SO_4 et $HClO_4$ en (MPa).
- Tableau A4.1 :** Valeurs de la résistance à la compression des classes de ciments.
- Tableau A2.2 :** Temps de début de prise des ciments

TABLES DES MATIERES

TABLES DES MATIERES

Le ciment est un composant essentiel des matériaux cimentaires tels que le béton et le mortier. Il assure une fonction mécanique, car il lie le squelette granulaire, mais il est aussi en grande partie responsable de la tenue à long terme du matériau cimentaire. La conception d'un matériau cimentaire est extrêmement liée à l'environnement dans lequel il va être exposé durant sa durée de vie.

L'addition de quantité de Zn et Cr dans le ciment portland peut absorber une quantité de ces métaux cette absorption conduit à une augmentation du temps de prise et une diminution de résistance des ciments pour le Cr. Il peut piéger le Cr avec un temps de prise courts et de hautes résistances.

L'expérimentation a porté sur le mortier avec différent dosage de Zn et Cr 2%, 4%, 6%.

Les résistances à la traction par flexion et la compression à 2J, 7J, 28J, et 90J pour confirmé l'influence de Cr et Zn sur le mortier.

Mots Clés : Clinker, gypse, Chrome, Zinc, ciment CPJ-CEM II A, mortier, eau potable, Résistances, compression, flexion.